

**T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞITIK ÜRETİM TESİSLERİNİN MAKSİMUM ŞEBEKE ENTEGRASYON  
LİMİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR METODOLOJİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**KADİR DOĞANŞAHİN**

**DOKTORA TEZİ  
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI  
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN  
DOÇ. DR. RECEP YUMURTACI**

**İSTANBUL, 2018**

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞITIK ÜRETİM TESİSLERİNİN MAKSİMUM ŞEBEKE ENTEGRASYON  
LİMİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR METODOLOJİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Kadir DOĞANŞAHİN tarafından hazırlanan tez çalışması 15.05.2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı**

Doç. Dr. Recep YUMURTACI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Recep YUMURTACI  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR  
Gelişim Üniversitesi

Doç. Dr. Bülent ORAL  
Marmara Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa BAYSAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU  
Yıldız Teknik Üniversitesi

## ÖNSÖZ

---

Bir elektrik enerjisi üretimi yaklaşımı olarak, dağıtık üretim, günümüzde oldukça fazla bir şekilde rağbet görmektedir ve güç sistemleri içerisindeki nüfuzu her geçen gün artmaktadır. Merkezi üretim altyapısına sahip geleneksel güç sistemlerine, dağıtık üretim tesislerinin katılımlarının artması, güç sistemleri içerisinde çeşitli sorunların yaşanmasına sebep olabilmektedir. Bu tez kapsamında, dağıtık üretimin güç sistemleri içerisinde neden oldukları gerilim sorunları esas alınarak, gerekli incelemelerde bulunulmuş ve güç sistemleri içerisinde bu sorunların oluşmasına neden olmayacak maksimum bağlantı kapasitesi hesabında kullanılmak üzere iki farklı matematiksel model önerilmiştir. Literatürdeki ilgili çalışmalarda ve önerilen matematiksel modellerin türetilmesi aşamasında benimsenen yaklaşımların ve kullanılan yöntemlerin, olabildiğince teorik temellere dayalı anlatımları ile sunulmasına gayret gösterilmiştir. Bu açıdan değerlendirildiğinde, sunulan çalışma, konu üzerine çalışan kişilere faydalı bilgiler sağlayabileceğini ümit etmekteyim.

Tez çalışması boyunca, engin bilgisini ve tecrübesini benimle paylaşan, tüm süreç boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Kendisi ile geçirdiğim bu süreçte edindiğim kazanımların ifadesini birkaç satıra sığdırmak mümkün değil. Elektrik mühendisliği eğitiminin çınarlarından birisi olan sayın hocamın ilk doktora öğrencisi olabilmek benim için büyük bir onurdur.

Yine tez çalışmamda değerli zamanını benden esirgemeyen, tezimin her aşamasında ve karşılaştığım her sorunda benimle ilgilenen ve bana sürekli yardımlarda bulunarak yol gösteren sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU'na teşekkürlerimi borç bilirim.

Tez çalışmalarım süresince, verdiği destek, gösterdiği sabır ve anlayış için Sevgili Eşime minnetlerimi sunarım. Tezimle birlikte büyüyen biricik kızımdan, bu süreçte kendisi ile geçirebileceğim zamandan çaldığım her bir dakika için özür dilerim. Herşeyden öte ve herşeyden önce hayatımın her safhasında, benden desteklerini esirgemeyen, benim için kendilerini hiçbir fedakârlıktan sakınmayan Canım Anneme ve Babama hakkıyla teşekkür edebilmem mümkün değil. Eğer bu tez benim için bir başarı ise, bu başarının en büyük payı onlara aittir.

Mayıs, 2018

Kadir DOĞANŞAHİN

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖZET .....	xi
ABSTRACT .....	xiii
<b>BÖLÜM 1</b>	
GİRİŞ .....	1
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı.....	7
1.3 Katkı ve Özgün Değer .....	8
<b>BÖLÜM 2</b>	
DAĞITIK ÜRETİM .....	9
2.1 Tanım.....	9
2.2 Dağıtık Üretimin Fayda Potansiyeli .....	10
2.2.1 Arz Talep Dengesinin Kurulmasında Arzın Desteklenmesi.....	11
2.2.2 Kayıpların Azaltılması ve Sistem Verimliliğinin Artırılması .....	11
2.2.3 Enerji Piyasasına Katılımda Çeşitlilik ve Yatırımcılara Sağladığı Fırsatlar .....	12
2.2.4 Dağıtık Üretim Tesislerinin Yan Hizmetler Olarak Kullanımı .....	13
2.3 Dağıtık Üreticilerin Şebeke Üzerindeki Etkileri .....	14
2.3.1 Dağıtık Üretimin Güç Sistemlerinde Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkisi .....	16
2.4 Dağıtık Üretim Ulusal Mevzuat.....	17
<b>BÖLÜM 3</b>	

SİSTEM MODELLEMESİ VE YÖNTEM .....	25
3.1 Mevcut Matematiksel Modellerin İncelenmesi.....	26
3.1.1 Matematiksel Model – 1 (MM - 1).....	26
3.1.2 Matematiksel Model – 2 (MM – 2) .....	32
3.1.3 Matematiksel Model – 3 (MM – 3) .....	33
3.2 Yeni Matematiksel Modelin Geliştirilmesi .....	33
3.3 Sistemdeki Yüklerin ve Üreticilerin Dikkate Alınması .....	38
3.3.1 Ağ indirgeme teknikleri .....	42
3.3.1.1 Ward İndirgeme Yöntemi.....	42
3.3.1.2 Kron İndirgeme Yöntemi .....	43
3.3.2 Örnek Güç Sistemine İndirgeme Yönteminin Uygulanması .....	43
BÖLÜM 4	
DURUM ANALİZLERİ .....	53
4.1 Test Sistemi.....	54
4.2 Sistemin Yüksüz Durumu Esas Alınarak Gerçekleştirilen Analizler .....	55
4.3 Sistemin Yüklü ve Üreticili Durumunun Analizi .....	62
4.3.1 DÜ Planlamalarda Ward Ağ İndirgeme Yönteminin Kullanımı .....	63
4.3.2 Bara – 20 için Maksimum İzin Verilebilir DÜ Bağlantı Kapasitesinin İncelenmesi.....	65
4.3.3 Bara – 3 için Maksimum İzin Verilebilir DÜ Bağlantı Kapasitesinin İncelenmesi.....	74
BÖLÜM 5	
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	82
KAYNAKLAR.....	85
EK-A	
34 BARALI RADYAL TEST SİSTEMİ .....	90
EK-B	
NEWTON RAPHSON GÜÇ AKIŞ ANALİZİ MATLAB KODLARI .....	92
EK-C	
WARD İNDİRGEME YÖNTEMİ MATLAB KODLARI.....	97
ÖZGEÇMİŞ.....	99

## SİMGE LİSTESİ

---

$V$	Gerilim
$\Delta V$	Gerilim sapması
$\Delta V_d$	Boyuna gerilim sapması
$\Delta V_q$	Enine gerilim sapması
$I$	Akım
$I''$	Kısa devre akımı
$Z$	Empedans
$Y$	Admitans
$R$	Direnç
$X$	Reaktans
$S$	Görünür güç
$S''$	Kısa devre gücü
$P$	Aktif güç
$Q$	Reaktif güç
$\delta$	Gerilim faz açısı
$\varphi$	Akım faz açısı
$\theta$	Empedans veya kısa devre gücü faz açısı

## KISALTMA LİSTESİ

---

AG	Alçak gerilim
DÜ	Dağıtık Üretim
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu
EÜAŞ	Elektrik Üretim Anonim Şirketi
MM	Matematiksel model
OBN	Ortak bağlantı noktası
pu	Per unit
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
YG	Yüksek gerilim

## ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2.1 Geleneksel elektrik şebekeleri yapısı ve güç akış yönü .....	15
Şekil 2.2 Dağıtık üretim tesislerinin elektrik şebekelerine dahil edilmesi ve sonrasında oluşabilecek çift yönlü güç akışının gösterimi.....	15
Şekil 2.3 Rüzgâr Santralı Reaktif Güç Kapasite Eğrisi.....	22
Şekil 2.4 Güneş Enerjisine Dayalı Fotovoltaik Üretim Tesisleri Reaktif Güç Kapasite Eğrisi .....	23
Şekil 2.5 Zorunlu Reaktif Güç Değerlerinin Bağlantı Noktası Gerilimine Bağlı Değişimi .....	23
Şekil 2.6 Santrallerin gerilim değişimlerine reaktif güç tepkisi .....	24
Şekil 3.1 Matematiksel modellerin ön incelemelerinde esas alınan örnek güç sistemi modeli .....	26
Şekil 3.2 Örnek güç sistemi modeline DÜ bağlantı gösterimi .....	27
Şekil 3.3 (a) Sonsuz güçlü bara ve DÜ bağlantı noktası gerilimleri için fazörel diagram, (b) Gerilim düşümü fazörüne ait bileşenler .....	34
Şekil 3.4 Boyuna gerilim sapmasının sistem empedansı faz açısı $\theta$ ve akım faz açısı $\varphi$ değişimlerine göre davranışı .....	36
Şekil 3.5 Enine gerilim sapmasının sistem empedansı faz açısı $\theta$ ve akım faz açısı $\varphi$ değişimlerine göre davranışı .....	36
Şekil 3.6 (a) DÜ bağlantı sonrasında yüksüz durum için, (b) DÜ bağlantı sonrası yüklü durum için güç akışı görselleri.....	39
Şekil 3.7 Örnek güç sisteminde 3 numaralı baranın kaldırılması sonrasında elde edilen eşdeğer sistem .....	45
Şekil 3.8 Örnek güç sisteminde 3 ve 6 numaralı baraların kaldırılmaları sonrasında elde edilen eşdeğer sistem .....	45
Şekil 3.9 Örnek güç sisteminde 3, 6 ve 4 numaralı baraların kaldırılmaları sonrasında elde edilen eşdeğer sistem .....	46
Şekil 3.10 Örnek güç sisteminin 1 ve 5 baralarına indirgenmesi sonrasında elde edilen eşdeğer sistem .....	46
Şekil 3.11 Bara – 5' teki dağıtık üretici ile Bara – 4'teki yükün Bara - 3 üzerinde yapmış oldukları ortak bağlantı.....	47
Şekil 4.1 34 Baralı Radyal Güç Sistemi .....	54
Şekil 4.2 Test sisteminin ETAP modeli .....	57



Şekil 4.3	Bara – 27 için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin, dağıtık üretici güç faktörüne göre değişimi .....	59
Şekil 4.4	Bara – 5 için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin, dağıtık üretici güç faktörüne göre değişimi .....	60
Şekil 4.5	Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin kısa devre gücü faz açısı ve DÜ güç faktörü değişimleri karşısındaki davranışı.....	61
Şekil 4.6	DÜ bağlantı noktası gerilimi faz açısının kısa devre gücü faz açısı ve DÜ güç faktörü değişimleri karşısındaki davranışı .....	62
Şekil 4.7	Ward indirgeme yöntemi için takip edilen akış şeması .....	64
Şekil 4.8	Ortak bağlantı noktasının belirlenmesine yönelik görsel .....	67
Şekil 4.9	Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler.....	69
Şekil 4.10	Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler.....	69
Şekil 4.11	Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler.....	71
Şekil 4.12	Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler.....	72
Şekil 4.13	Örnek Yüklenme Verileri .....	73
Şekil 4.14	Örnek yüklenme durumunda Denklem 3.50 ile elde edilen kapasitede bir DÜ'nün sistem eklenmesi öncesinde ve sonrasında gerilim değerleri .....	74
Şekil 4.15	Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dâhil edilmeden önceki ve dâhil edildikten sonraki gerilimler.....	76
Şekil 4.16	Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dâhil edilmeden önceki ve dâhil edildikten sonraki gerilimler.....	77
Şekil 4.17	Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dâhil edilmeden önceki ve dâhil edildikten sonraki gerilimler.....	78
Şekil 4.18	Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler.....	79
Şekil 4.19	Örnek yüklenme durumunda Denklem 3.50 ile elde edilen kapasitede bir DÜ'nün sistem eklenmesi öncesinde ve sonrasında gerilim değerleri .....	80

## ÇİZELGE LİSTESİ

---

	Sayfa
Çizelge 2-1 Yıllara göre kurulu gücün kuruluş türlerine göre dağılımı [60], [61].....	18
Çizelge 3-1 Literatürdeki mevcut matematiksel modellerin eksik yönleri.....	34
Çizelge 4-1 Bara – 27 için yapılan hesaplamalar ve analizler sonrasında elde edilen sonuçlar.....	57
Çizelge 4-2 Bara – 5 için yapılan hesaplamalar ve analizler sonrasında elde edilen sonuçlar.....	60
Çizelge 4-3 Minimum tüketim, maksimum üretim durum senaryosunu oluşturan yükler ve üreticiler.....	63
Çizelge 4-4 Ortak bağlantı noktalarına ait kısa devre güçleri.....	67
Çizelge 4-5 Sistemdeki dağıtık üreticilerin bağlı oldukları baralara ait kısa devre güçleri.....	68
Çizelge 4-6 Genel karşılaştırma tablosu.....	81
Çizelge A-1 Genel karşılaştırma tablosu.....	90

## DAĞITIK ÜRETİM TESİSLERİNİN MAKSİMUM ŞEBEKE ENTEGRASYON LİMİTİNİN BELİRLENMESİ İÇİN YENİ BİR METODOLOJİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Kadir DOĞANŞAHİN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Enerji sektörü, dünya ekonomilerinde oldukça önemli yere sahiptir ve elektrik enerjisi bu sektördeki payını her geçen gün artırmaktadır. Son yıllarda artan enerji talebi ve yükselen çevresel ve ekonomik endişeler, sektör içerisinde, temiz enerji kullanımı ve yüksek verimlilik eğilimlerini oluşturmuştur. Bunun neticesinde güç sistemleri hızlı bir değişim sürecine girmiştir. Dağıtık üretim (DÜ), bu sürecin getirdiği yenilikçi bir üretim şeklidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının güç sistemlerine katılımına olanak sağlaması ve sistem kayıplarını azaltabilmesi yönünde sunmuş olduğu fayda potansiyeli dağıtık üretimin cazibesini artırmış ve dağıtık üretim tesislerinin güç sistemleri içerisinde yaygınlaşmasına sebep olmuştur.

Diğer taraftan, dağıtık üretim, merkezi üretim ve tek yönlü güç akışı altyapısına sahip geleneksel güç sistemleri açısından aykırı bir üretim olması sebebiyle güç sistemlerinde çeşitli sorunlara sebep olabilmektedir. Bu sorunlardan biri, güç sistemleri açısından oldukça büyük önem arz eden gerilim kalitesinin, dağıtık üretim katılımlarından etkilenmesidir. Dağıtık üreticiler, sisteme bağlandıkları nokta ve etrafında gerilim artışına neden olurlar. Doğru planlanmamış bir DÜ katılımı, sistemde aşırı gerilimlere sebep olabilir. Sistemdeki gerilim artışı, sisteme dâhil edilen DÜ birimin kapasitesi ile yakından ilişkilidir.

Dağıtık üreticilerin sağladığı faydalardan maksimum yönde yararlanabilmek ve sebep olabilecekleri sorunları minimuma indirebilmek amacıyla, güç sistemlerine DÜ katılımların en doğru şekilde gerçekleştirilmesi yönünde planlamaların yapılması önemlidir. DÜ planlama çok yönlü bir çalışmadır ve bu konu üzerine oldukça geniş bir literatür bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında, sisteme bağlanacak DÜ birimin kapasitesi ile bağlantı sonrasında oluşacak sistem gerilimleri arasındaki ilişkinin matematiksel bir model üzerinden ifade edilmesi amaçlanmıştır. Böyle bir matematiksel modelin elde edilmesi ile sistemde aşırı gerilim sorunlarına yol açmayacak maksimum DÜ bağlantı kapasitesinin hesaplanabilmesi mümkün olabilecektir ve bu yönüyle DÜ planlama çalışmalarında başvurulan bir hesaplama aracı olarak literatüre katkı sağlayabilecektir.

Literatürde aynı amaca uygun önerilen çeşitli matematiksel modeller yer almaktadır. Ancak bu modellerin türetilmesi aşamasında çeşitli varsayımlar ve ihmaller esas alınmıştır ve tamamı sistemin yüksüz durumunu esas alarak türetilmişlerdir. Bu çalışma iki kademeli olup, ilk kademesinde, sistemin yüksüz durumu esas alınarak türetilen matematiksel modellerin, kabul ettikleri varsayımlar ve ihmaller olmaksızın, yeni bir matematiksel modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sonrasında ise sistemin yüklü ve üreticili durumunda kullanılabilir bir matematiksel modelin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Önerilen matematiksel modellerin kabiliyetlerini test etmek amacıyla 34 baralı bir test sistemi üzerinde çeşitli durum analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, önerilen matematiksel modellerin, alternatiflerine göre daha doğru ve tutarlı sonuçlar verebildiklerini kanıtlamışlardır.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistemleri, Dağıtık Üretim, Dağıtım Sistemleri, Gerilim, Maksimum Kapasite,

**DEVELOPMENT OF A NEW METHODOLOGY FOR DETERMINING THE  
MAXIMUM NETWORK INTEGRATION LIMIT OF DISTRIBUTED  
GENERATION FACILITIES**

Kadir DOĞANŞAHİN

Department of Electrical Engineering

Ph.D. Thesis

Adviser: Assoc. Prof. Dr. Recep YUMURTACI

The energy sector has a very important place in world economies and electricity energy is increasing its share in this sector day by day. Increasing energy demand and rising environmental and economic concerns in recent years have created tendencies on clean energy use and high efficiency within the sector. As a result of that, power systems have been entered into a process of change. Distributed Generation (DG) is an innovative generation concept, which is brought by these changes. Enabling integration of renewable energy sources into power systems and reducing system losses have increased the attractiveness of DG systems and have led to the increase their penetration in power systems.

On the other hand, distributed generation can lead to various problems in power systems, as it is a production that is contrary to traditional power systems which are based on centralized energy generation and unidirectional power flow. One of these problems is voltage quality, which is very important in terms of power systems, is affected by the distributed generation integration. Distributed generation units cause an increase in voltage at and around the integration point. Incorrectly planned DG integration may cause over voltages which is closely related to the capacity of the DG unit integrated into the system.

DG planning is quite important, in order to achieve maximum benefits from DG and to minimize the possible problems. DG planning is a versatile issue and there is a wide literature on this subject. In this thesis study, it is aimed to express the relationship between the capacity of the DG systems and the voltage values of the system after DG integration through a mathematical model. After the determination of such a mathematical model, it is possible to calculate the maximum DG integration capacity which will not cause overvoltage problems in the system, and this will be able to contribute to the literature as a calculation tool used in DG planning studies.

In the literature, there are various mathematical models which are focused on the same purpose. However, in the course of the derivation of these models, various assumptions and omissions have been taken as basis, and they are all derived based on the zero load case of the system. This study is two stage and in the first stage, it is aimed to propose a new mathematical model by developing the mathematical models derived from the unloaded state of the system. Subsequently, it is aimed to obtain a mathematical model that can be used for including the loads and generators of the systems into the calculations.

In order to test the capabilities of the proposed mathematical models, a variety of case studies have been performed on a 34-Bus radial test system. The obtained results show that; the mathematical model proposed for the zero load case of the system gives higher and more consistent results than the alternatives given in the literature.

**Keywords:** Distributed Generation, Distribution Systems, DG Planning, Maximum Capacity, Voltage Quality

## BÖLÜM 1

---

### GİRİŞ

Tez çalışması 5 ana bölümden oluşmaktadır. Tezin ilk bölümünün içeriği, tez çalışmasında ele alınan konu ile alakalı literatürün incelenmesi, tezin amacı ve literatüre sağlayacağı katkılar üzerine olacaktır. İkinci bölümde, tez bünyesinde gerçekleştirilen çalışmaların anlaşılabilirliğini artırmak ve okuyucuya, konu ile alakalı uygun bir arka planın oluşturulabilmesi amacıyla tez içeriği ile ilgili temel bilgiler sunulmuştur. İkinci bölüm içeriği genel hatları ile geleneksel elektrik şebekelerinin yapısı, dağıtık üretim kavramı ve dağıtık üretim sistemleri için ulusal şebeke yönetmeliklerinin incelenmesi üzerinedir.

Üçüncü bölüm iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda literatürdeki benzer çalışmalar ve bu çalışmalarda benimsenen yaklaşımların ve önerilen yöntemlerin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Üçüncü bölümün ikinci kısmında ise tez çalışması kapsamında önerilen yöntemler ve çözümler anlatılmıştır. Dördüncü bölümde, literatürde önerilen çözüm yöntemleri ile tez kapsamında geliştirilen ve çözüm için önerilen yöntemler bir test sistemi üzerinden, uygun senaryolar altında incelenmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak en uygun çözüm yöntemi araştırılmıştır. Gerçekleştirilen durum analizleri sonrasında elde edilen bulguların tartışıldığı ve çalışma üzerine önemli notların paylaşıldığı sonuç ve öneriler bölümü ile çalışma sonlandırılacaktır.

#### 1.1 Literatür Özeti

Dünya nüfusundaki artış, yükselen yaşam standartları, gelişen teknoloji ve endüstrileşen sektörler enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır. Diğer taraftan, yükselen çevresel ve ekonomik endişeler, bilinçli enerji kullanımı ve yüksek verimlilik gibi konulara olan hassasiyeti artırmıştır. Yüksek bir ivme ile artmakta olan enerji ihtiyacı, son yıllarda

yükselen duyarlılık ve izlenen politikalar sayesinde dizginlenebilmiştir. Yapılan araştırmalar neticesinde önümüzdeki 25 yıllık süreçte küresel enerji ihtiyacında, mevcut değerlerin üçte biri kadar bir artışın gerçekleşeceği tahmin edilmektedir [1]. Geçen 25 sene için küresel birincil enerji ihtiyacına ait veriler değerlendirildiğinde, bu artışın 25 sene önceki birincil enerji ihtiyacı miktarının yaklaşık üçte ikisi kadarı ile gerçekleşmiş olduğu görülmektedir.

Elektrik enerjisi, nihai bir enerji formudur. Diğer enerji türlerine göre, iletimi ve dağıtımı daha kolaydır, kullanımı basittir ve kullanımından sonra herhangi bir atık bırakmaz. Bu özellikleri nedeniyle birçok alanda kullanılan elektrik enerjisine olan talep hızla artmaktadır. 25 yıl içerisinde gerçekleşmesi beklenen küresel enerji ihtiyacı artışının, %70'inin elektrik enerjisi tarafından gerçekleşeceği öngörülmektedir [1]. Bu durumu tetikleyen faktörlerin başında, elektriğin erişilebilirliğinin artması ve farklı enerji kaynakları kullanılan sektörlerde elektrik enerjisi kullanımına yönelik geçişlerin yaşanması gelmektedir. Gelişen teknoloji ile uzak noktalara elektrik enerjisinin iletimi veya bu noktalarda şebekeden bağımsız bir şekilde, elektrik enerjisi üretimini gerçekleştirebilmek imkânı elde edilmiştir ve böylece elektrik kırsal alanlarda dahi erişilebilir bir enerji formu haline gelmiştir [2]. Diğer taraftan, ulaşım sektöründe elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması [3] veya fosil yakıtlar ile faaliyet gösteren iklimlendirme sistemlerinde elektrik enerjisi kullanımına geçişlerin artması sektörlerde yaşanan değişimlere örnek olarak verilebilir. Dolayısıyla elektrik enerjisi ihtiyacındaki artış, enerji ihtiyacındaki artışa göre daha yüksek bir hızda gerçekleşmektedir [4] ve bizi bekleyen çeyrek asırda bu artışın daha da ivmeleneceği öngörülmektedir [1].

Paylaşılan verilerden de anlaşılacağı üzere, elektrik enerjisinin hayatımızdaki etki alanı ve önemi her geçen gün biraz daha artmaktadır. Bunun yanı sıra, enerjinin kalitesi, sürdürülebilirliği ve güvenilirliği daha öncesinde hiç olmadıkları kadar yüksek öneme sahip konular haline gelmişlerdir. Artan çevresel ve ekonomik endişeler enerji sektöründe olduğu gibi, elektrik enerjisi sektöründe de çeşitli arayışlara ve değişimlere önayak olmuştur. Dağıtık üretim, sektördeki bu arayışlara cevap verebilecek potansiyelde bir üretim uygulaması olarak öne çıkmış, güç sistemlerinde yerini almış ve kısa zamanda yaygınlaşmıştır [5].



Dağıtık üretim, (DÜ), en genel tanımıyla, güç sistemlerine, dağıtım seviyesinden direk olarak ya da sayacın kullanıcı tarafına bağlanan elektrik üretimidir [6]. Güç sistemlerinde dağıtık üretim tanımına uygun üretim faaliyetleri genellikle rüzgâr türbinleri, fotovoltaik (PV) sistemler, küçük içten yanmalı türbinler ve kombine ısı güç (CHP) sistemlerinden oluşan tesisler ile gerçekleştirilmektedir. [7]. Bu faydalar güç sistemleri açısından değerlendirildiğinde; iletim ve dağıtım hatlarının yüklenmelerini azaltarak planlanan kapasite artırımı veya yenileme yatırımlarının ertelenmesi ya da gerekliliğinin ortadan kaldırılması, DÜ tesislerin yan hizmetlere katılımları ve piyasada çeşitliliğin artırılması ile aşırı fiyat oluşumlarının engellenmesi olarak sıralanabilir. Tüketici açısından değerlendirildiğinde, şebekeye paralel olarak üretim faaliyetinin gerçekleştirilmesi neticesinde tüketicinin (uygulayıcı) enerji güvenliğinin artması, tüketicinin kendi tüketim ihtiyacını karşılayabilmesine imkân tanınması ve fazla üretimi şebekeye satarak kendisine gelir sağlaması gibi imkânlar ya da gerektiğinde şebekeden bağımsız çalışabilme gibi seçenekler sunar [7], [8].

Diğer taraftan, bu kadar yüksek fayda potansiyeline ve hatta daha fazlasına sahip olan dağıtık üretim, bazı özellikleri ile güç sistemleri içerisinde çeşitli sorunlara yol açabilmektedir. Bu sorunların temelinde yatan sebep, dağıtık üretimin, geleneksel güç sistemlerinin merkezi üretim anlayışına dayanan yapılanmasına aykırı olmasıdır [9]. Geleneksel güç sistemlerinde, yüksek kurulu güçlerde santraller ile üretilen elektrik enerjisi, iletim hatları vasıtasıyla dağıtım bölgelerine doğru iletilerek, tüketicilerin kullanımına sunulur. Dolayısıyla, geleneksel güç sistemleri tek yönlü güç akışı altyapısına sahiptir. Sistemin kendisi ve sistem içerisindeki işleyişi düzenleyen alt sistemler, tek yönlü güç akışı esas alınarak tasarlanmışlardır. Dağıtık üretim tanımına uygun tesislerin güç sistemleri içerisindeki nüfuzlarının artması neticesinde, sistemin son uç noktası olan dağıtım seviyelerinden iletim sistemine doğru güç akışları gerçekleşebilir. Böylesi durumlarda, çift yönlü yük akışına maruz kalan güç sistemi ve bileşenleri işlevlerini yitirebilir veya hatalı çalışabilirler. Tüm bunların neticesinde güç sisteminin sürdürülebilirliği ve güvenilirliği kötü yönde etkilenir [8], [10], [11]. Dağıtık üretimin güç sistemlerine sağlayabileceği faydalar ve sistem üzerinde oluşturabileceği etkiler ilerleyen bölümlerde daha detaylı bir şekilde incelenecektir.

Dağıtık üretim tabanında güç sistemlerine katılım gösterecek üreticilerden elde edilebilecek faydaları en üst düzeye çıkarmak ve yaşanabilecek sorunları en aza indirmek için başarılı bir planlamanın yapılması gerekir. Literatürde dağıtık üretim planlaması olarak anılan bu yaklaşım, bir dizi hedef ve çeşitli sistem kısıtlamalarına uygun olarak, bir sisteme dâhil edilmesi planlanan üretim tesisinin veya tesislerinin tipini, büyüklüğünü ve / veya konumunu belirleme sürecidir [12]. Literatürde, DÜ planlama üzerine çok sayıda çalışma bulunmaktadır [13]–[17]. Bu çalışmalar esas aldıkları kapsam, benimsedikleri yaklaşım ve kullandıkları yöntemlere göre birbirlerinden farklılıklar gösterirler.

Gerçekleştirilen DÜ planlama çalışmalarında esas alınan kapsamlar dikkate alındığında, en geniş literatürün, DÜ boyutlandırma ve konumlandırma kapsamı üzerine gerçekleştirilen çalışmalara ait olduğu görülür. Bu çalışmalara ait güncel bir derleme Prakas ve Khatod tarafından [18]'de sunulmuştur. Ayrıca, DÜ boyutlandırma [19] ve DÜ konumlandırma [20] kapsamlarının ayrı ayrı incelendikleri çalışmaların sayıları da oldukça fazladır. DÜ planlama çalışmalarında esas alınan kapsamın hangi amaca ve hangi kısıtlara göre değerlendirileceği, çalışmada benimsenen yaklaşımı ifade eder. Sisteme dâhil edilecek dağıtık üretici için en yüksek kapasiteyi belirlemek, sistem kayıplarını en aza indirmek, enerji maliyetlerini en aza indirmek ve çeşitli güvenilirlik indisleri üzerinden sistem güvenilirliğini en üst düzeye çıkarmak, literatürdeki çoğu DÜ planlama çalışmalarınca, en uygun sonuçların elde edilebilmesi için benimsenen amaçlardan bazılarına verilebilecek örneklerdendir. Bu amaçlara göre çalışılan değerlerin incelenmesinde dikkate alınan teknik ve ekonomik kısıtlamalara örnek olarak; sistem gerilim kararlılığının yüklenebilirlik sınırı, sistem bileşenlerinin ısı kapasiteleri, mevzuatlarca belirlenen üst ve alt güç kalitesi sınırları ve yatırımın bütçe sınırları verilebilir. DÜ planlama çalışmaları, belirli bir kapsam çerçevesinde, bir veya birkaç amacın, tek veya birden fazla kısıta tabi olacak şekilde incelenmesi suretiyle gerçekleştirilebilir. Söz konusu literatüre ait çalışmalarda, benimsenen yaklaşımlara göre tasniflerin yapıldığı güncel tarama çalışmaları [14], [18], [21] ile verilmiştir.

DÜ planlama çalışmalarını birbirinden farklı kılan bir diğer özgün değer ise çalışmalarda kullanılan çözüm yöntemleridir. Bazı çalışmalarda tek bir amaç ile tek bir kısıt arasındaki ilişki, analitik yöntemler yardımıyla, matematiksel bir model üzerinden kurulabilmiştir. Bazı çalışmalarda ise birden fazla amaç fonksiyonunun, birden fazla kısıta göre

değerlendirilmesi ve tüm bu değerlendirmeler neticesinde en uygun çözümün elde edilebilmesi amaçlanır ve böylesi çalışmalarda çeşitli optimizasyon algoritmalarından faydalanılır. Analitik yöntemler, yapay zeka yöntemleri, sezgi üstü algoritmalar, optimizasyon algoritmaları ve bunlardan iki veya daha fazlasının beraber kullanıldığı melez uygulamalar DÜ planlama çalışmalarında kullanılan yöntemlerden bazılarına örnek olarak gösterilebilir. DÜ planlama çalışmalarında, kullanılan çözüm yöntemleri ile alakalı güncel ve kapsamlı bir taksonomi [16] ile verilmiştir.

“Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi” ve “Barındırma kapasitesi” (hosting capacity) özel DÜ planlama çalışmalarındandır ve literatürde önemli yere sahiptirler. Dağıtık üreticilerin güç sistemlerine katılımları sonrasında, bağlantı yaptıkları nokta ve etrafında gerilimler yükselir [22], [23]. Güç sistemi ile bileşenlerinin ve sisteme bağlı kullanıcıların, sistemdeki gerilim dalgalarından zarar görmelerini engellemek üzere, sistem gerilimleri izin verilebilir alt ve üst gerilim değerleri ile sınırlandırılırlar [24], [25]. Sistem içerisindeki herhangi bir nokta için, izin verilebilir gerilim değerlerinin dışına çıkmaksızın eklenebilecek maksimum DÜ kapasitesi, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Verilen tanımdan ve anlatımdan anlaşılacağı üzere, DÜ boyutlandırma kapsamına giren maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi çalışmasında esas olarak belirlenen amaç DÜ kapasitenin en yüksek değeri almasıdır [26]. Ayrıca elde edilecek kapasitenin, sistem gerilimlerini izin verilebilir değerlerin ötesine taşımaması için izin verilebilir üst gerilim değeri temel kısıt olarak alınır. Barındırma kapasitesi ise, sistem içerisinde bir nokta için, sistemin işleyişinde herhangi bir soruna yol açmayacak ve teknik açıdan bir sıkıntı yaratmayacak en yüksek DÜ katılım kapasitesine karşılık gelir. Barındırma kapasitesi çalışmalarında benimsenen yaklaşım, sisteme ait tüm teknik kısıtların dikkate alınması ve bu kısıtların aşılmasına neden olmayacak maksimum kapasitenin elde edilmesi yönündedir [9], [27]–[30]. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi çalışmalarında, bağlantı kapasitesi analitik yöntemler ile oluşturulan matematiksel modeller ile ifade edilebilir. Bu haliyle, bu çalışmalarda elde edilen matematiksel model, birçok kısıt ile sınırlanan barındırma kapasitesi incelemelerinde, gerilim kısıtına ilişkin maksimum kapasite değerini veren tek bir işlem adımı olarak kullanılabilirler. Literatürde, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin elde edilebilmesi amacıyla önerilmiş 3 farklı matematiksel model

bulunmaktadır. Ancak bu matematiksel modeller çeşitli ihmaller ve varsayımlar kabul edilerek türetilmişlerdir.

Bu matematiksel modellerden birinde, matematiksel model sadece birim güç faktöründe katılımlar göz önünde bulundurularak tasarlanmıştır. Bunun yanısıra, bağlantı noktasına ait gerilimin faz açısı, hesaplamalarda dikkate alınmamıştır. Bu çalışma [31]'de önerilmiştir. Yürürlükteki yönetmeliklerde ve tanımlanmış standartlarda, DÜ birimlerin güç sistemlerine farklı güç faktörleri değerlerinde bağlanabilmelerine izin verilmektedir ve hatta bazı durumlarda bağlantının gerçekleştirildiği sistemin sorumluları tarafından, dağıtık üreticiden belirli bir ayar noktasında sisteme dâhil olunmasını talep edebilir [24], [25], [32]. Farklı güç faktörleri ile gerçekleştirilecek DÜ katılımı, birim güç faktörü ile gerçekleştirilen katılımlardan farklı gerilim sapmalarına neden olur. Dolayısıyla, önerilen matematiksel model, izin verilen maksimum kapasite hesaplamasında yanıltıcı sonuçlar doğurabilir. Bunun yanısıra, yapılan çalışmada, bağlantı noktası gerilimi bileşenlerinin ihmal edilmiş olması matematiksel modelin doğruluğunu etkileyecektir. Bu yaklaşımlar ile elde edilen matematiksel model sadece belirli DÜ katılım koşulları için kabul edilebilir olsa da, genel bir yöntem olarak alınamaz. Ancak bu matematiksel model, basit bir ifade sunuyor olması sebebiyle, konu hakkında yaklaşık fikir sahibi olabilmek için pratik uygulamalarda kullanılabilir. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi için önerilen matematiksel modeller arasında en yaygın olarak kabul göreni literatürde birçok çalışmada kullanılmıştır [33]–[37]. Bu matematiksel modelde, DÜ birime ait güç faktörü kapasite hesaplamalarına dahil edilmiştir. Diğer taraftan, önceki matematiksel modelde olduğu gibi, enine gerilim sapsması ihmal edilmiştir. Ayrıca, matematiksel modelin türetilmesinde güç sistemindeki kayıplar dikkate alınmamıştır. Jothibas ve Santoso, [38]'de DÜ katılım sonrasında sistemde oluşan kayıpları hesaplamalara katarak yeni bir matematiksel modelin önermesini yapmışlardır.

Bu matematiksel modellerin tamamında DÜ katılım sonrasında, bağlantı noktası gerilimindeki sapmanın enine bileşeni hesaplamalara dahil edilmemiştir. Bunun yanısıra, tüm bu matematiksel modellerin türetilmesinde, sistemin yüksüz durumu esas alınmıştır.

## 1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında, bir güç sistemine belirli bir noktadan dahil edilebilecek dağıtık üretici kapasitesi ile aynı noktanın gerilimi arasındaki ilişkinin matematiksel bir model üzerinden oluşturulması amaçlanmıştır. Bu matematiksel modelden elde edilebilecek kapasitenin, sistem izin verilebilir gerilim sınırları kısıtlamasında maksimum değeri incelenerek, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi için yeni bir matematiksel modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Literatürde, bu amaçla önerilen 3 farklı matematiksel model mevcuttur. Bu matematiksel modeller, ilerleyen bölümlerde detaylı bir şekilde inceleneceklerdir. Literatür özetinde bahsedildiği gibi, bu matematiksel modellerin türetilmesi aşamasında, sisteme DÜ katılımı sonrasında, bağlantı noktasında oluşan gerilim sapsmasının enine bileşeni hesaplamaların dışında tutulmak suretiyle ihmal edilmiştir. Ayrıca bu matematiksel modellerin tamamında, sistemin yüksüz durumunu esas alan bir yaklaşım benimsenmiştir.

DÜ katılım sonrasında bağlantı noktasında oluşan gerilim sapsması, sistemin karakteristik değerlerine, DÜ birimin kapasitesine ve güç faktörüne bağlı olarak değişmektedir [39]. Bu gerilim sapsmasının enine bileşeni bazı şartlar altında çok küçük değerler alabilmektedir. Literatürdeki çalışmalarda, bu durum esas alınarak, mevcut matematiksel modellerin tamamında bu bileşen ihmal edilmiştir. Gerilim sapsmasının, enine bileşeninin yüksek değerler alabileceği çalışmalarda, mevcut matematiksel modellerin kullanılması yanıltıcı sonuçlar verebilir. Gerçek değer ile matematiksel modeller kullanılarak elde edilen değer arasındaki farklılığın yapılacak çalışma üzerindeki etkisi, çalışmanın hassasiyetine göre farklı boyutlarda olabilir. Bu nedenle, tez çalışmasında, ilk olarak, gerilim sapsmasının enine bileşeninin hesaplamalara dâhil edebildiği bir matematiksel modelin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ardından, sistemin yüklü ve üreticili durumu için mevcut matematiksel modellerin ve önerilen matematiksel modelin, yorumlanması ile doğru bir yaklaşımın oluşturulması ve yeni bir matematiksel modelin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Güç sistemlerinin oldukça büyük ve karmaşık yapılar olması sebebiyle, tamamen yüksüz oldukları bir durumun varlığını esas almak, konuya gerçekçi bir yaklaşım sunmayacaktır. Bunun yanı sıra, dağıtık üretim sistemleri, günümüzde oldukça ilgi gören ve ilerleyen

zaman ile birlikte güç sistemlerine nüfuzlarının artması beklenen sistemlerdir. Sisteme bağlı DÜ birimler, sisteme sağladıkları üretim ile sistem gerilimlerini artırıcı yönde etki oluştururlar. Aşırı gerilimlerin önüne geçebilmek amacıyla, sisteme katılması planlanan DÜ birimin dışında sistemde var olan DÜ birimlerin maksimum izin verilebilir bağlantı kapasitesine etkileri dikkate alınmalıdır. Literatürde böyle bir ihtiyaca cevap verebilen matematiksel bir modelin gerekliliği göz önünde bulundurularak; bir güç sistemi içerisinde belirli bir nokta için, sistemde aşırı gerilim sorunlarına neden olmaksızın, bu noktadan sisteme dâhil edilebilecek maksimum DÜ katılım kapasitesinin, sistemdeki yükler ve üreticiler dikkate alınarak hesaplanmasında kullanılabilir bir matematiksel modelin önerilmesi amaçlanmıştır.

### 1.3 Katkı ve Özgün Değer

Tez çalışması ile bir güç sistemine katılacak dağıtık üretimin maksimum izin verilebilir bağlantı kapasitesinin hesaplanmasında kullanılabilir, iki farklı sistem durumu için oluşturulmuş iki matematiksel modelin literatüre katkısı gerçekleştirilecektir. Bu matematiksel modellerden birisi sistemin yüksüz durumunu ve diğeri ise sistemin yüklü ve üreticili durumunu esas alarak DÜ bağlantı kapasitesi ile sistemin üst gerilim limiti arasındaki matematiksel ilişki ifade etmektedir. Literatürde sistemin yüksüz durum senaryosunu esas alan ve aynı matematiksel ilişkiyi ifade eden farklı matematiksel modeller bulunmaktadır. Ancak bunlar önceki bölümlerde bahsedildiği gibi bazı yönleri ile eksiklerdir. Sistemin yüksüz durum senaryosu için önerilen matematiksel model, mevcut matematiksel modellerin eksikliklerini giderecek şekilde geliştirilmiştir.

Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosunda kullanılabilir bir matematiksel model ise literatürde bulunmamaktadır. DÜ planlama çalışmalarında, aşırı gerilim endişesi en hassas konulardan biridir. Elde edilen matematiksel modeller ile DÜ bağlantı kapasitesi ile bağlantı sonrasında sistem gerilimleri arasındaki ilişki, iteratif işlemler veya özel optimizasyon algoritmaları kullanımına gerek olmaksızın kolay bir şekilde kullanıma sunulmuştur. Bu matematiksel modeller, çeşitli DÜ planlama çalışmalarının gerektirdiği optimizasyon algoritmalarında amaç fonksiyonu olarak kullanılabilir. Böylece, mevcut matematiksel modellerin kullanılması ile elde edilen sonuçlara kıyasla daha başarılı sonuçlar elde edilebilir.

### DAĞITIK ÜRETİM

Dağıtık üretim yeni bir kavram olmasa da yakın geçmişte popüleriği artmış ve farklı uygulamalar ile güç sistemlerinde varlık göstermeye başlamış bir üretim yaklaşımıdır. Bu bölümde, dağıtık üretimin tanımı, güç sistemlerine ve kullanıcılarına sağlayabilecekleri faydalar, dâhil edildikleri güç sistemlerine etkileri ve bu sistemler için çeşitli mevzuatlarca belirlenen bağlantı kriterleri incelenecektir.

#### 2.1 Tanım

Dağıtık üretim literatürde “Distributed Generation” isimlendirmesi ile yaygın olarak kabul görmektir. Ancak literatürde kabul gören farklı isimlendirmeler de yapılmıştır. Bu isimlendirmeler, kabul gördükleri ve ait oldukları bölgelere ile Kuzey Amerika ülkelerinde “Dispersed Generation”, Güney Amerika ülkelerinde “Embedded Generation”, Avrupa ve Asya ülkelerinde ise “Decentralized Generation” olarak verilebilir [7]. Türkçe literatürde ise “Dağıtık Üretim” tabiri üzerinde ortak bir kabul oluşmuştur.

Dağıtık üretim kavramının tanımlanmasına yönelik literatürde farklı yaklaşımlar benimsenmiştir. Dolayısıyla, kesin bir fikir birliği oluşturulamamıştır. Öyle ki, bazı çalışmalarda üreticinin kapasitesi, bazılarında sistem içerisindeki bağlantı noktası, bazılarında ise kullanım amacına göre çeşitli ifadeler kullanarak dağıtık üretim tanımlanmıştır [7]. Literatürdeki bilimsel çalışmalar, araştırma enstitülerinin hazırlamış olduğu raporlar ve farklı ülkelerin ilgili mevzuatlarında dağıtık üretim tesislerinin kapasiteleri için farklı güç aralıkları üzerinden çeşitli tanımlamalar yapılmıştır. Ancak bu güç aralıklarının belirlenmesi temelinde teknik esaslara dayanan bir yaklaşım

bulunmamaktadır. Belirtilen güç aralıklarının dışında dağıtık üretim yapılabileceği gibi, bu güç aralıkları dâhilinde kurulu güce sahip geleneksel üretimin yapılabilmesi pek tabii mümkündür. Dolayısıyla, DÜ kapasitesi için herhangi bir güç aralığının belirtildiği bir tanımın kapsayıcı ve belirleyici olması beklenemez. Diğer taraftan, literatürde, DÜ tesislerin güç sistemi içerisindeki bağlantı noktasını esas alan ifadeleri içeren tanımlamalara rastlanabilmektedir. Bu tanımlamalar, güç sistemleri içerisindeki iletim ve dağıtım şebekeleri veya gerilim seviyeleri üzerinden yapılan tarifler ile ifade edilmektedir. Böyle bir tanımlamanın uluslararası düzeyde bir geçerliliği söz konusu olamaz. Güç sistemi içerisindeki alt sistemlere ait sınırlar ve kullanılan gerilim seviyeleri ülkeden ülkeye farklılık gösterebilmektedir. Ayrıca, bazı DÜ tanımlarında, bu konseptin kullanım amacına atıflarda bulunulmuştur. Ancak DÜ tesislerin kullanımı, gelişen teknolojiler ile birlikte artan çeşitliliktedir ve uygulayıcıya veya sistem operatörüne bağlı olarak aynı sistemin farklı amaçlar ile kullanılması mümkündür. Bu nedenle, DÜ konsepti için oluşturulacak bir tanımda, kullanım amacına yönelik bir kapsamın belirtilmesi, tanımın kapsayıcılığını azaltabilir [40]. Ackermann ve Anderson [40]'de verilen çalışmada, tüm bu bahsedilen hususlar ve daha fazlasını dikkate alarak, mevcut tanımların değerlendirilmesini ve ardından DÜ kavramına yönelik en uygun tanımın önermesinde bulunmuşlardır. Önerilen DÜ tanımı, tez çalışması kapsamında, en uygun tanımlama olarak kabul görmüştür ve aşağıdaki gibidir;

**Tanım 2.1** *“Dağıtık üretim, doğrudan dağıtım şebekesine veya sayacın müşteri tarafına bağlı bir elektrik güç kaynağıdır [6].”*

## 2.2 Dağıtık Üretimin Fayda Potansiyeli

Dağıtık üretim, güç sistemleri ve tüketicileri açısından yüksek fayda sağlama potansiyeline sahiptir [7]–[10]. Bu nedenle, günümüzde, dağıtık üretim sistemleri oldukça fazla bir şekilde rağbet görmektedir ve güç sistemleri içerisindeki nüfuzu gün geçtikçe artmaktadır. Bu sistemlerin sağlayacağı faydalardan en fazla şekilde istifade edebilmek DÜ planlamanın temel amacıdır [13]. Bu bölümde, dağıtık üretimin güç sistemlerine ve uygulayıcılara sağlayabileceği faydalardan bahsedilecektir.



### **2.2.1 Arz Talep Dengesinin Kurulmasında Arzın Desteklenmesi**

Enerjinin hayatımızdaki yeri ve öneminin artması ve bunun paralelinde, elektrik enerjisinin küresel nihai enerji formları arasında en yüksek artış gösteren enerji formu olması, elektrik enerjisinin arz talep dengesini hiç olmadığı kadar hassas bir konu haline getirmiştir [1]. Dağıtık üretim, isminden de anlaşılacağı üzere, güç sistemleri içerisinde sağladığı üretimle arz talep dengesine katkıda bulunur. Geleneksel üretim sistemlerinden farklı olarak, tüketime yakın bölgelerden güç sistemlerine katılım gösteren DÜ tesisleri, tüketim bölgelerindeki enerji kaynaklarının (rüzgâr, güneş... vb) ve farklı tüketim süreçleri sonrasında ortaya çıkan atık enerjinin (kojeneratif uygulamalar ile) kullanımına imkân sağlaması sebebiyle özgün bir fayda potansiyeline sahiptir.

Yeterli kapasite ve kararlılıkta bir dağıtık üretim tesisi ile bir tüketim bölgesinin şebekeden ayrı bir şekilde işletilmesine olanak sağlanabilir. Böylece bu tüketim bölgesinde, çeşitli nedenlerden dolayı güç sisteminde gerçekleşebilecek kesintilerden etkilenmesinin önüne geçilerek enerji arzının sürekliliği sağlanabilir. Bu şekilde çalışmaya ada çalışma ve böyle şebekelere ise mikro şebekeler denir [41].

Sistemdeki tüketiciler açısından değerlendirildiğinde, tüketicinin kendi ihtiyacını karşılayabilecek elektrik enerjisini üretmesi ve hatta ihtiyacından fazlasını bağlı olduğu sistemin sorumlu dağıtım şirketine satabilmesi sayesinde, tüketici enerji maliyetlerini düşürebilir ve kendisine ek gelir sağlayabilir. Ayrıca, güç sistemindeki herhangi bir kesinti sonrasında, tüketici, ihtiyacı olan enerjinin arzını kendi üretimi ile karşılayabilir ve böylece sisteminin devamlılığı sağlayabilir [8].

### **2.2.2 Kayıpların Azaltılması ve Sistem Verimliliğinin Artırılması**

DÜ sistemler, güç sistemlerinde tüketime yakın bölgelerden dahil olduklarından, şebekeden talep edilen enerjinin bir kısmının arzını, talep noktasına yakın bir bölgeden karşılayabilmektedir. Dolayısıyla, tüketim bölgelerindeki DÜ tesislere görece daha uzak konumlar bulunan geleneksel üretim tesislerinden bu bölgelere iletilecek enerjinin miktarını azaltabilir. Azaltabildiği enerji miktarınca, iletim ve dağıtım hatlarında oluşacak güç kayıplarının önüne geçer. Böylece, talep edilen enerjinin sadece geleneksel üretim ile arz edilmesi durumuna göre aynı talep daha az kayıplarla arz edilebilir [42], [43].

Bunun yanısıra, güç sistemleri tasarımında, sistemi bileşenlerinin kapasiteleri, anlık ihtiyaçlara cevap verebilecek yeterlilikte olmaktan ziyade uzun vadeli yaklaşımlar ile belirlenmektedir. Sistem bileşenlerinin yüksek kapasitelerdeki eşdeğerleri ile değiştirilmesi veya kapasitelerinin artırılması oldukça zahmetli ve maliyetli bir iştir. Bir tüketim bölgesine yeni tüketicilerin katılması veya var olan tüketimin öngörülemez miktarlarda artması nihayetinde, bu bölgeyi besleyen sistem bileşenleri yetersiz kalabilir. Sistemin devamlılığı için, yüklenebilirlikleri yetersiz kalan bileşenlerin kapasitelerinin artırılması veya yeni tesislerin kurulması ihtiyacı doğabilir. Söz konusu bölgede DÜ tesislerin varlığı durumunda, artan enerji ihtiyacının bir kısmı bölgenin içerisinde sağlanarak, şebekeden tüketicilere iletilecek enerjinin miktarı azaltılabilir. Böylece, bölgeyi besleyen iletim ve dağıtım hatları ve söz konusu tüketicilerin şebeke üzerinden beslenmesinde rol alan diğer sistem bileşenlerinin yüklenmeleri azalır. Dolayısıyla kapasite artırımı veya ek tesislerin kurulmasına yönelik yatırımların ertelenmesi veya tamamen ihtiyaçlarının ortadan kaldırılması sağlanabilir. Böylece, DÜ, sistem bileşenlerinin ekonomik ömürlerini artıracak yönde bir fayda sağlayabilir [8], [10].

Diğer taraftan, dağıtık üretim sistemleri ağırlıklı olarak rüzgâr, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarından üretim yapan tesisler ve çeşitli süreçler neticesinde ortaya çıkan atık enerjinin çevrimini yapan kojeneratif sistemlerden oluşmaktadır. Bu sistemlerin elektrik üretiminde kullandıkları birincil enerji kaynakları ücretsiz ve çevre dostudur. Genelde fosil tabanlı ve enerji maliyetleri yüksek olan yakıtlardan elektrik enerjisi üreten geleneksel üretim santralleri ile enerji arzının tamamının gerçekleştirilmesinden ziyade, bu arzın bir kısmının yenilenebilir enerji tabanlı ve kojeneratif DÜ tesisleri ile gerçekleştirilmesi verimliliği artırıcı bir fayda sağlar [44].

### **2.2.3 Enerji Piyasasına Katılımda Çeşitlilik ve Yatırımcılara Sağladığı Fırsatlar**

Dağıtık üretimin güç sistemlerinde kullanımının yaygınlaşması öncesinde, elektrik üretimi sadece büyük güçlü santraller tarafından merkezi bir şekilde gerçekleştirilmekteydi. Bu santrallerin kurulumları, oldukça yüksek maliyetler ve ileri teknikte altyapı gerektirdiğinden dolayı, bu yatırımlar sadece devlet kurumlarının ve güçlü yatırımcıların girişimleri ile gerçekleştirilebilmektedirler. Bu nedenle, elektrik enerjisi piyasası, günümüze oranla, daha az sayıda katılımcıdan oluşmaktaydı. Ancak

geçen zaman içerisinde dağıtık üretim tesislerinin güç sistemlerine dahil edilmesinin önünün açılması ile bu durum değiştirmiştir [45]. Dağıtık üretim tesisleri, geleneksel güç santrallerine göre daha düşük kapasitelerde ve görece daha basit uygulanabilirlikte olmaları sebebiyle, daha düşük kurulum maliyetleri ve daha ulaşılabilir teknik alt yapı imkânları ile gerçekleştirilebilir yatırımlardır. Bunun yanısıra, geleneksel santrallere göre daha hızlı kurulum süreçlerine ve daha kısa vadeli geri ödeme sürelerine sahiptirler [7]. Yatırımcılar açısından daha az riske karşılık gelen bu özellikler, DÜ tesislerine yönelik yatırımları daha uygulanabilir ve cazip kılmıştır. Böylece elektrik piyasalarına daha fazla üreticinin katılımına imkân sağlanmıştır ve geçmişe oranla daha serbest bir elektrik piyasası oluşturulmuştur. Bunun yanısıra, piyasadaki bu serbestleşme ile elektrik enerjisi fiyatlandırmasında aşırı yüksek değerlerin oluşmasının önüne geçilmiştir [10].

#### **2.2.4 Dağıtık Üretim Tesislerinin Yan Hizmetler Olarak Kullanımı**

Türkiye Elektrik Piyasası Düzenleme Kurumu, yan hizmetleri şu şekilde tanımlamıştır;

**Tanım 2.2** *“İletim sistemine veya dağıtım sistemine bağlı ilgili gerçek/tüzel kişilerce sağlanacak olan, iletim veya dağıtım sisteminin güvenilir şekilde işletimini ve elektriğin gerekli kalite koşullarında hizmete sunulmasını sağlamak üzere tanımlanan hizmetlerdir.”* [46]. Ulusal şebekede, yan hizmetler olarak, primer frekans kontrolü, sekonder frekans kontrolü, anlık talep kontrolü, oturan sistemin toparlanması ve reaktif güç kontrolü gibi faaliyetler gerçekleştirilmektedir. Günümüzde, bu faaliyetler genel olarak iletim seviyelerine bağlı geleneksel üreticiler ile gerçekleştirilmektedir. Dağıtım şebekelerinde, ağırlıklı olarak reaktif güç kontrolü hizmeti sunulabilmektedir ve bu hizmet sisteme paralel bağlı anahtarlamalı veya ayarlanabilir kapasiteler ile gerçekleştirilmektedir. Dağıtık üretim tesisleri ile yan hizmetlerin gerçekleştirilmesine ise nadiren başvurulmaktadır. Yakın gelecekte, gelişen sistem altyapısı ve üretim kontrol teknikleri ile dağıtık üreticilerin bu hizmetlerin sunumunda kullanımlarının artması beklenmektedir. Böylece, tüketim seviyelerindeki arz talep dengesizlikleri veya güç kalitesindeki bozulmalar, iletim sistemine yayılmadan giderilebilecektir [47].

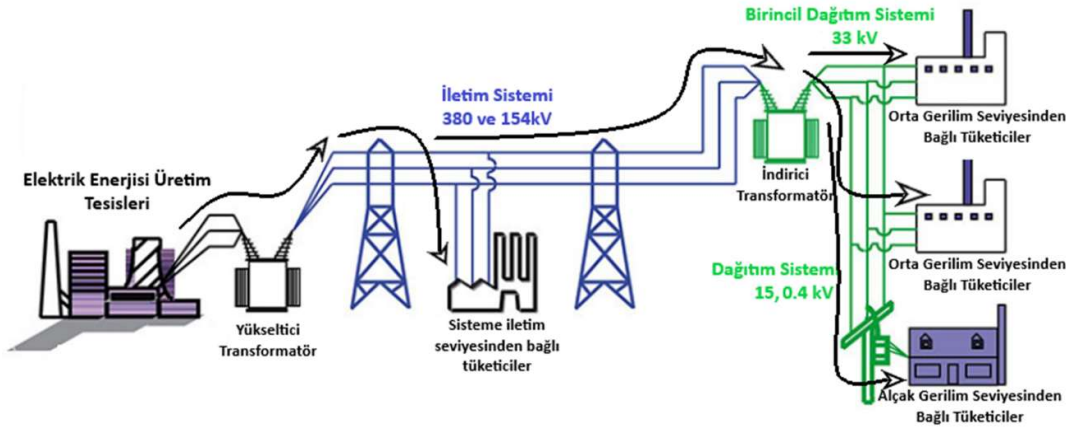
### 2.3 Dağıtık Üreticilerin Şebeke Üzerindeki Etkileri

Geleneksel güç sistemleri, merkezi üretim altyapısına sahiptir. Büyük güçlü santrallerden üretilen enerjinin, iletim hatları ile tüketim bölgelerine taşınması ve dağıtım şebekesi üzerinden tüketicilere dağıtılması ana hattında bir çalışma presibine sahiptir. Dolayısıyla tek yönlü güç akışı temelinde çalışmaktadır [45]. Dağıtık üreticiler ise, güç sistemlerine tüketim tarafından bağlanarak enerji üretim faaliyetleri gerçekleştiren tesislerdir. Güç sistemlerinin herhangi bir bölgesindeki dağıtık üreticilerin üretimleri, o bölgeye ait tüketimi aştığında, söz konusu bölgeden güç sistemine doğru ters yönlü bir güç akışı gerçekleşir. Tek yönlü güç akışı esas alınarak tasarlanan geleneksel güç sistemleri, çift yönlü güç akışı halinde çeşitli sorunlar yaşayabilmektedir [10].

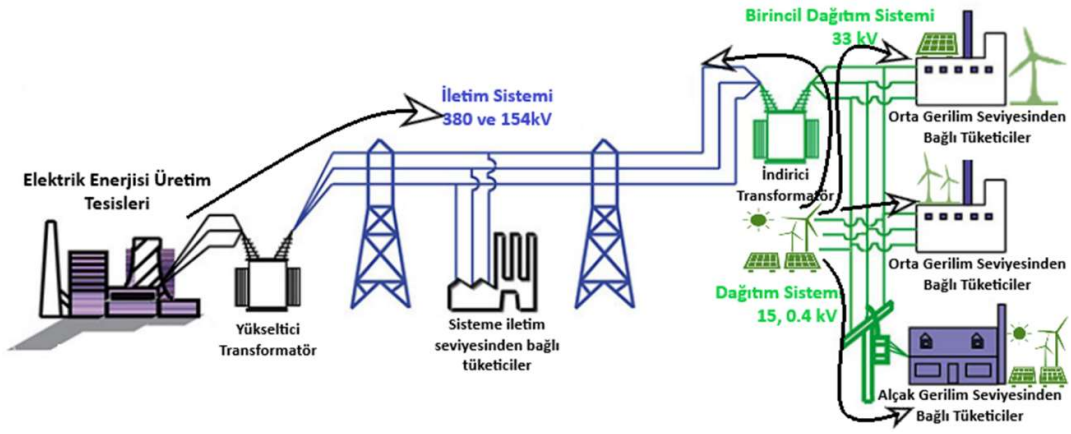
Bu sorunlar arasında, en önemlilerinden birisi, dağıtık üreticilerin katılımı neticesinde sistemin gerilim kontrolünde oluşabilecek sorunlardır. Bu çalışma kapsamında, dağıtık üreticilerin sistem gerilimleri üzerindeki etkisi dikkate alan bir DÜ bağlantı kapasitesi yaklaşımı benimsendiğinden dolayı, dağıtık üreticilerin bu etkisi ayrı bir başlık halinde incelenecektir.

Güç sistemlerine DÜ katılımı, koruma sistemi üzerinde çeşitli etkiler oluşturabilir. Koruma sistemi, güç sistemindeki anormal durumları tespit ederek, bu durumlara en kısa sürede uygun aksiyonun gösterilmesi ve sistemin tekrar normal çalışma koşullarına döndürülmesi vazifesini gören alt sistemdir. Geleneksel güç sistemlerinde olduğu gibi, koruma sistemleri de tek yönlü güç akışı esasına göre tasarlanır. DÜ katılımlar neticesinde gerçekleşebilecek çift yönlü güç akışları, koruma sisteminin hatalı çalışmasına veya tamamen işlevini yitirmesine neden olabilir [48].

Geleneksel elektrik şebekelerine ait genel yapı ve geleneksel elektrik şebekelerinde gerçekleşen güç akış yönü Şekil 2.1 ile gösterilmiştir. Sisteme dağıtık üreticilerin katılması sonrasında oluşan geleneksel elektrik şebekesi yapısı ve dağıtık üreticilerin güç sistemleri içerisinde neden olabilecekleri çift yönlü güç akışı Şekil 2.2 ile gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Geleneksel elektrik şebekesi yapısı ve geleneksel elektrik şebekelerinde güç akışı



Şekil 2.2 Geleneksel elektrik şebekelerine dağıtık üretim katılımı ve sonrasında gerçekleşebilecek çift yönlü güç akışının gösterimi

Dağıtık üreticiler çoğunlukla rüzgâr, güneş gibi rejimi kararsız ve tahmin edilmesi zor olan yenilenebilir enerji kaynakları ile üretim yapabilen sistemlerden tesis edilmektedirler. Dolayısıyla, bu tür dağıtık üreticilerin çıkışları belirsizlik teşkil etmektedir. Bunun yanı sıra, geleneksel güç sistemlerinde, üreticiler merkezi bir otoriteye bağlı olarak çalışmaktadır. Dağıtık üreticilerin güç sistemlerine katılımı ile birlikte merkezden bağımsız üreticilerin varlığı söz konusu olabilecektir. Bu durumda, arz talep dengesinin kurulması sürecinde ve elektrik piyasalarının işleyişinde çeşitli sıkıntılar zuhur edebilir. Bunun en güncel örneği olarak, ulusal şebekesinde ciddi oranda yenilenebilir tabanlı dağıtık üreticiler barındıran Almanyada, DÜ tesislerin üretimlerindeki dalgalanmalar neticesinde 2017 yılında, birçok kez elektrik enerjisi arzının, talebin üzerinde kalması durumu tecrübe

edilmiş ve bunun neticesinde elektrik enerjisi piyasalarında negatif fiyatlama durumu ile karşı karşıya kalmıştır [49].

DÜ sistemler, farklı teknik altyapılara sahip üreticilerden oluşabilmektedir. Fotovoltaik sistemler ile güneş enerjisinden elektrik enerjisi üreten dağıtık üretim tesisleri, güç sistemlerine invertörler aracılığıyla bağlanabilmektedir. Invertörler, yüksek frekansta güç elektroniği elemanlarının anahtarlanması ile fotovoltaik sistemlerin doğru akım çıkışını, şebekeye uygun frekansta ve senkronizasyonda alternatif akıma dönüştürür. Bu çalışma esnasında sistemde harmonik bileşenlerin enjekte edilmesine sebep olurlar. Diğer taraftan rüzgâr türbinleri ile elektrik enerjisi üretimi yapan dağıtık üreticiler ise asenkron motorlar ile tesis edilirler. Asenkron motorlar ise güç sisteminden reaktif güç çeken elemanlardır. Böyle tesislerin sayılarının artması neticesinde, güç sistemi bileşenleri reaktif güç iletimi ve dağıtımını gereksiz yere yüklenebilir ve sistemin verimliliğinin düşmesine neden olabilir [45].

### **2.3.1 Dağıtık Üretimin Güç Sistemlerinde Gerilim Kontrolü Üzerindeki Etkisi**

Dağıtık üretim tesisleri, dahil edildikleri güç sistemlerinde, bağlandıkları noktada ve etrafında gerilim artışına sebep olurlar. Bu gerilim artışı, bazı durumlarda (özellikle düşük gerilimlere sahip olan şebekeden uzak tüketim noktalarında), sistem için faydalı olabilmektedir. Ancak normal koşullar altında çalışmakta olan sistemlere belirli bir kapasitenin üzerinde DÜ katılımı, sistemde aşırı gerilim sorunlarının oluşması yol açabilir [45]. Güç sistemlerini oluşturan bileşenlerin ve sisteme bağlı tüketicilerin, sistemde oluşabilecek gerilim sapmalarından zarar görmelerini engelleyebilmek amacıyla çeşitli mevzuatlar kapsamında üst ve alt gerilim sınırları ile tanımlanmış gerilim aralıkları bulunmaktadır ve sistemin çalışmasında bu aralıklara uyulması zorunludur. Bu aralıkların aşılmasına neden olabilecek girişimler çeşitli sistem mekanizmaları tarafından telafi edilmeye çalışılır, mevcut mekanizmalar ile telafisi mümkün olmayan girişimler ise sistemden ayrılır veya sistemi hataya zorlar [50].

Sorunsuz çalışmakta olan bir güç sistemine, herhangi bir kapasitede, herhangi bir sistem noktasından dağıtık üretim dâhil edilmesi neticesinde, sistemde düşük gerilim sorunlarının yaşanması beklenmez. Ancak dağıtık üreticilerin, sistem içerisinde gerçekleştirdikleri üretim faaliyeti neticesinde, bağlantı noktası ve etrafındaki

gerilimlerin yükselmesine neden olarak, bu noktalarda üst gerilim sınırını aşan gerilimlere neden olmaları mümkündür [9].

Bir dağıtık üretim tesisinin, bir güç sistemine dâhil edilmesi neticesinde oluşturacağı gerilim artışı, dağıtık üreticinin kapasitesi ile yakından ilgilidir. Bunun yanısıra, sistemin yüklenme durumu, bağlantı noktasının karakteristik değerleri ve dağıtık üreticinin güç faktörü gerilim artışının miktarını belirleyen diğer unsurlardır [39]. Bu çalışmada, sistemin üst gerilim sınırı dikkate alınarak, aşırı gerilim sorunları oluşturmayacak maksimum DÜ kapasitenin tespiti amaçlanmıştır. Dağıtık üreticilerin, sistem gerilimleri üzerindeki etkisi ile daha ayrıntılı bilgiye üçüncü bölümde ulaşılabilir.

#### 2.4 Dağıtık Üretim Ulusal Mevzuat

1984 yılında yürürlüğe giren “Türkiye Elektrik Kurumu Dışındaki Kuruluşların Elektrik Üretimi, İletimi, Dağıtımını ve Ticareti ile Görevlendirilmesi Hakkında Kanun” ile devlet kurumları dışındaki kuruluşlara elektrik enerjisi üretimi faaliyeti gerçekleştirme imkânı tanınmıştır [51]. Böylece güç sistemlerine serbest üreticilerin katılımının önü açılmıştır. Bu kanun ile sağlanan üretim izinleri, ilk olarak, büyük tüketimlere sahip abonelerin atık enerjilerini değerlendirebilmek ve kendi elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılayabilmek amacıyla (otoprodüktör) kurdukları üretim santralleri üzerinden karşılık görmüştür.

2001 yılında yürürlüğe giren “Enerji Piyasası Kanunu” ile güç sistemi içerisindeki her bir faaliyet için çeşitli lisans tanımlamaları oluşturulmuştur [52]. Bu lisanslardan birisi de üretim faaliyetlerinde bulunacak sistem katılımcıları için tanımlanan üretim lisansları olmuştur. İlerleyen zaman içerisinde, akarsu, rüzgar ve güneş gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde değerlendirilebilmesi amacıyla uygun altyapının oluşturabilmesi için, “Elektrik piyasasında üretim faaliyetinde bulunmak üzere su kullanım hakkı anlaşması imzalanmasına ilişkin usul ve esaslar hakkında yönetmelik” [53] ve “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanun” [54] gibi mevzuatlar yayımlanmıştır.

Yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretimini teşvik etmek üzere, Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı öncülüğünde çeşitli çalışmalar gerçekleştirilerek düzenlenen 5784 sayılı “Elektrik Piyasası Kanunu ve Bazı Kanunlarda Değişiklik Yapılmasına Dair

Kanun” [55] ve 6094 sayılı “Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Elektrik Enerjisi Üretimi Amaçlı Kullanımına İlişkin Kanunda Değişiklik Yapılmasına Dair Kanun” [56] ile lisanssız elektrik enerjisi üretimi gündeme gelmiştir. 2011 yılında yayımlanan “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik” [57] ile lisanssız elektrik üretimi ile ilgili oluşturulan mevzuat, 2012 yılında yayımlanan “Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmeliğin Uygulanmasına Dair Tebliğ” [58] ile fiilen uygulanmaya başlanmıştır.

Elektrik piyasasına ait mevzuatlar incelendiğinde, dağıtık üretim ile ilgili herhangi bir tanıma rastlanılamamaktadır. Mevzuatlar kapsamında, üretim faaliyetleri için, lisanslı ve lisanssız üretim olmak üzere iki genel başlık tanımlanmıştır. Mevzuatlarca oluşturulmuş bu başlıklar, literatürdeki dağıtık üretici tanımlaması açısından değerlendirildiğinde, tanımlayıcı bir ifadeye karşılık gelmemektedir. Diğer bir ifade ile bir dağıtık üretici, güç sistemi içerisinde, elektrik üretiminde kullandığı enerji kaynağına ve kurulu gücünün miktarına göre lisanslı veya lisanssız bir şekilde üretim faaliyeti gösterebilecektir. Ancak lisanssız elektrik üretimi faaliyetinde bulunacak tesisler için, özel durumlar dışında sadece dağıtım sistemi içerisinde katılıma izin verilebilmektedir [59]. Dolayısıyla lisanssız üretim faaliyetinde bulunan her bir üretim tesisi, dağıtık üreticiler kapsamında düşünülebilir. Lisanssız elektrik üretiminin önünü açan düzenlemeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretiminde kullanımına yönelik teşvikler sayesinde, güç sistemleri içerisinde dağıtık üretim kavramına uygun tesislerin sayısı artmıştır. Lisanssız elektrik üreticilerinin tamamının dağıtım sisteminden katılım göstermek zorunluluğunda olmaları göz önünde bulundurularak, Ulusal şebeke kurulu gücündeki lisanssız üretim payının incelenmesi, Ulusal şebeke içerisindeki dağıtık üreticilerin sisteme katılımlarındaki artış hakkında fikir verebilecektir. 2016, 2017 ve 28 Şubat 2018 sonu itibarıyla Ulusal şebeke kurulu gücünün kuruluşlara göre dağılımları Çizelge 2.1 ile verilmiştir [60], [61].

Yukarıda paylaşılan mevzuatların yanı sıra, elektrik piyasasında üretim faaliyetleri gösterecek katılımcılara yönelik geniş kapsam ve içerikte birçok mevzuat oluşturulmuştur. Bu bölümde, mevcut mevzuatların tez açısından önem arz eden ve yapılan çalışmalarda incelenen konuların anlaşılmasında fayda sağlayacağı düşünülen



Çizelge 2-1 Yıllara göre kurulu gücün kuruluş türlerine göre dağılımı [60], [61]

KURULUŞ TÜRLERİ	2016 Yılı sonu itibarıyla			2017 yılı sonu itibarıyla			28 Şubat 2018 itibarıyla		
	Kurulu Güç (MW)	Katkı (%)	Santral Sayısı (Adet)	Kurulu Güç (MW)	Katkı (%)	Santral Sayısı (Adet)	Kurulu Güç (MW)	Katkı (%)	Santral Sayısı (Adet)
EÜAŞ	20 105,0	26	-	19 899,8	23,4	62	20 035,0	23,3	58
İŞLETME HAKKI DEVREDİLEN SANTRALLAR	1 477,5	2	-	1 820,9	2,1	76	1 823,8	2,1	81
YAP İŞLET SANTRALLARI	6 101,8	8	-	6 101,8	7,2	5	6 101,8	7,1	5
YAP İŞLET DEVRET SANTRALLARI	1 637,3	2	-	1 378,9	1,6	15	1 378,9	1,6	15
SERBEST ÜRETİM ŞİRKETLERİ	48 258,1	61	-	52 353,3	61,4	1 127	52 570,8	61,0	1 140
LİSANSIZ SANTRALLER	917,6	1	-	3 645,3	4,3	3 736	4 204,7	4,9	4 855
<b>TOPLAM</b>	<b>78 497,4</b>	<b>100</b>	<b>-</b>	<b>85 200,0</b>	<b>100</b>	<b>5 021</b>	<b>86 144,9</b>	<b>100</b>	<b>6 154</b>

kısımlar dikkate alınmıştır. Tez çalışmasında, güç sisteminde aşırı gerilim sorunlarına neden olmaksızın, belirli bir noktadan dâhil edilebilecek maksimum DÜ bağlantı kapasitesinin matematiksel bir model üzerinden ifade edilmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla, sisteme katılacak dağıtık üreticilerin bağlantı kapasitesi sınırları, bağlantı gerilimleri, alabilecekleri güç faktörü değerleri ve sisteme bağlantı noktaları ile ilgili mevzuatlarda yer alan tanımların incelenmesi çalışmaya katkı sağlayacaktır.

Elektrik piyasasına üretici katılımları, iletim şebekesi içerisindeki dağıtım seviyelerinden veya dağıtım sisteminden bağlantılar ile gerçekleştirilebilmektedir [25]. İletim şebekesinde gerçekleştirilen katılımlar için “Elektrik Şebeke Yönetmeliği” [25], dağıtım sisteminden gerçekleştirilen katılımlar için ise “Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği” dikkate alınır [24]. Dağıtım sistemi içerisinde katılım yapacak üreticilerin üretim faaliyetleri, iletim şebekesini etkileyebilecektir. Bu nedenle dağıtım sisteminden gerçekleştirilen katılımlarda elektrik piyasası dağıtım yönetmeliğinin yanı sıra, elektrik şebeke yönetmeliğinin de dikkate alınması gerekir. Ayrıca, dağıtım sisteminden gerçekleştirilen katılımlarda, “Elektrik Piyasasında İletim ve Dağıtım Sistemlerine Bağlantı ve Sistem Kullanımı Hakkında Tebliğ” gereğince, bölgesel dağıtım şirketlerinin sisteme bağlantı hususunda belirttikleri kriterlerin dikkate alınması, söz konusu dağıtım şirketlerinin gerçekleştirilen bağlantı hakkında görüşünün ve onayının alınması lazım gelir. Elektrik Piyasası Dağıtım yönetmeliği, ikinci kısım, üçüncü bölüm içerisinde üretim tesislerinin tasarımı ve performans şartları ile ilgili kriterler yer almaktadır. Yönetmelik içerisinde sisteme bağlanacak üretim ünitelerinin 0.85 aşırı ikazlı ve 0.95 düşük ikazlı güç faktörleri arasında nominal güçte çıkış verebilir olmaları zorunlu tutulur. Bunun yanı sıra, ünitenin aktif gücü, gerilim değişimlerinden etkilenmeksizin ve reaktif güç çıkışının  $\pm$  %5 gerilim aralığı içerisinde emre amade olması gerektiği belirtilmiştir.

Elektrik Piyasasında Lisanssız Elektrik Üretimine İlişkin Yönetmelik’te, 11 kWe kurulu gücün altında olan üretim tesislerinin alçak gerilim (AG) seviyesinden, 11 kWe veya daha fazla kurulu güce sahip olan tesislerin ise alçak veya yüksek gerilim (YG) seviyesinden sisteme bağlantı yapacakları belirtilmiştir. Yine aynı mevzuat kapsamında, sisteme ait trafo merkezlerinin eşit haklar ile kullanımının sağlanabilmesi amacıyla, AG seviyesinden

bağlanacak üretim tesisleri için, bir transformatöre bağlı fiderlerdeki toplam üretici kapasitesinin, o transformatör gücünün yüzde ellisini geçmemesi şartı konulmuştur [59].

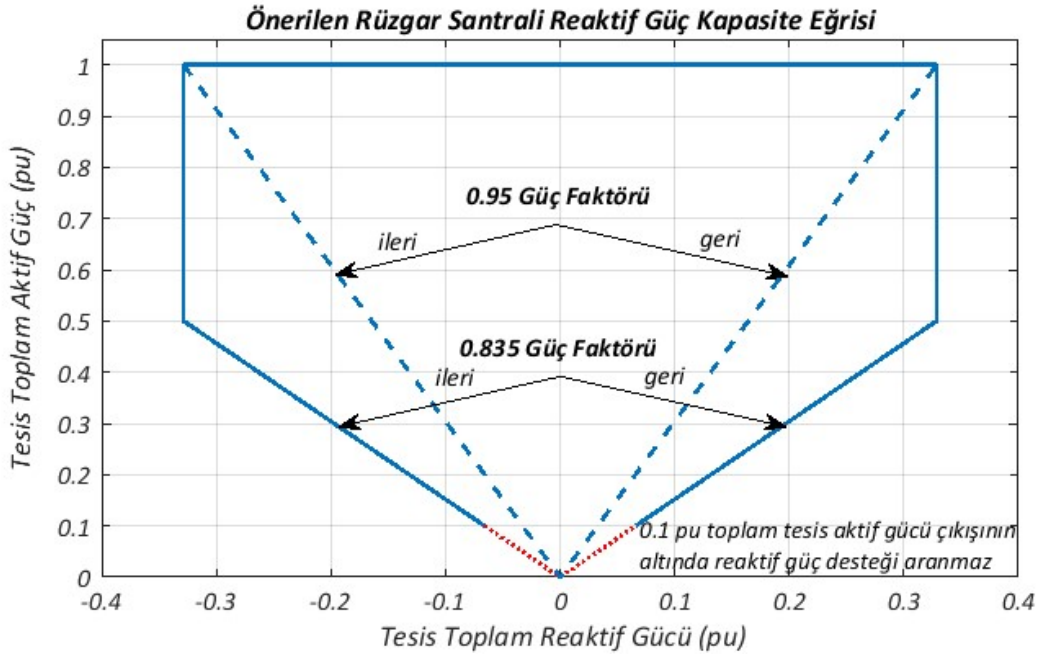
Elektrik Şebeke Yönetmeliği, ikinci kısım, üçüncü bölümünde, üretim tesislerinin tasarım ve performans şartları ile ilgili hususlar aktarılmıştır. İlgili bölümde rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı fotovoltaik üretim tesislerinin sistem bağlantısına ilişkin hükümler için ilgili yönetmeliği EK-18 isimli ekinde atıfta bulunulmuştur. EK-18 kapsamında iletim sistemine bağlı rüzgâr ve güneş enerjisine dayalı fotovoltaik üretim tesisleri, dağıtım sistemine orta gerilim seviyesinden bağlı güneş enerjisine dayalı lisans sahibi fotovoltaik üretim tesisleri ve kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgar enerjisine dayalı lisans sahibi üretim tesisleri için uygulanacak kriterler verilmektedir. Söz konusu ekte yer alan başlıklar aşağıdaki gibidir.

- Üretim tesislerinin arıza sonrası sisteme katkısı
- Aktif güç kontrolü
- Frekans tepkisi
- Reaktif güç kapasitesi
- Reaktif güç desteği sağlanması
- Üretim tesisi şebeke bağlantı transformatörü
- Üretim tesislerince TEİAŞ'a sağlanacak bilgiler
- Rüzgâr enerjisi santrallerinin izlenmesi

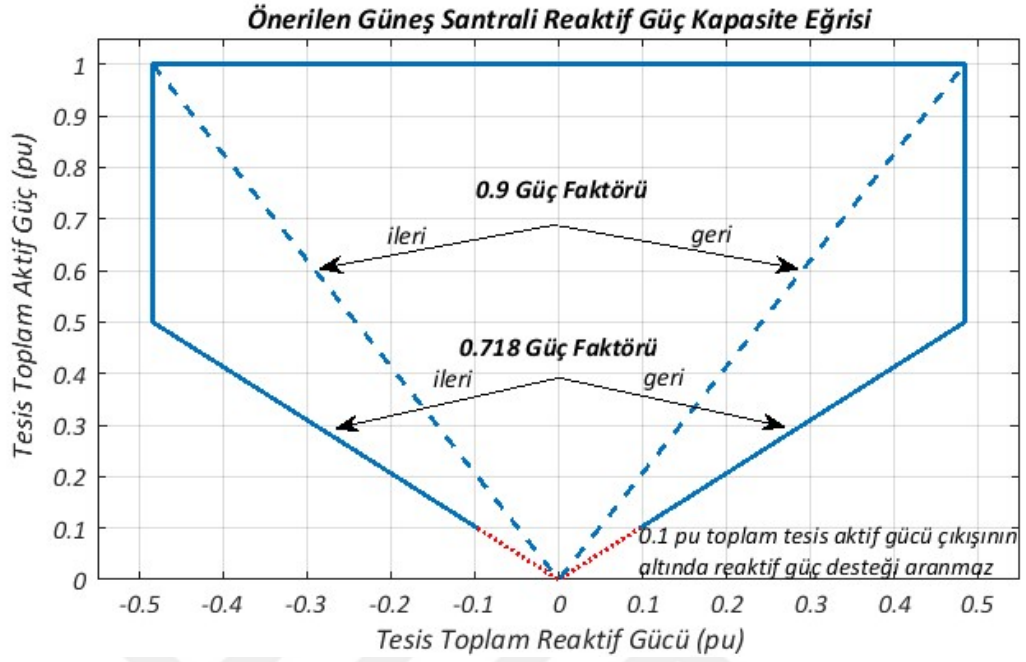
Tez bünyesinde, sistem içerisinde bir noktaya ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin hesaplanabilmesine yönelik gerçekleştirilmesi düşünülen çalışmalarda, incelenen kapasite değerinin güç faktörü ile ilişkisi dikkate alınmaktadır. Bunun yanı sıra, incelenen kapasite değerinin belirlenmesinde, aşırı gerilim durumlarından kaçılması esas alındığından dolayı, sistem için izin verilebilir gerilim değerleri bilgisi, incelenen kapasite üzerinde belirleyici etkiye sahip olması nedeniyle önemlidir. Bu nedenle EK-18 kapsamında, sisteme bağlanacak üreticiler için tanımlanan reaktif güç kriterlerinin incelenmesinde fayda görülmüştür. EK-18 içerisinde, iletim veya dağıtım noktasından sisteme katılım gösteren rüzgar ve güneş santralleri için uygun görülen reaktif güç kapasitesi eğrileri, sırasıyla Şekil 2.1 ve 2.2 ile aşağıda verilmiştir. Söz konusu santraller,

önerilen eğrilerdeki koyu çizgiler ile belirtilen sınırlar dâhilinde sürekli olarak çalışabilir olmak zorundadırlar. Yine belirtilen kapsam dâhilindeki santraller, Şekil 2.3'te verilen gerilim sınırları içerisinde kalmak şartı ile gerektiğinde belirli bir zorunlu reaktif güç değerlerine ulaşabilmelidirler.

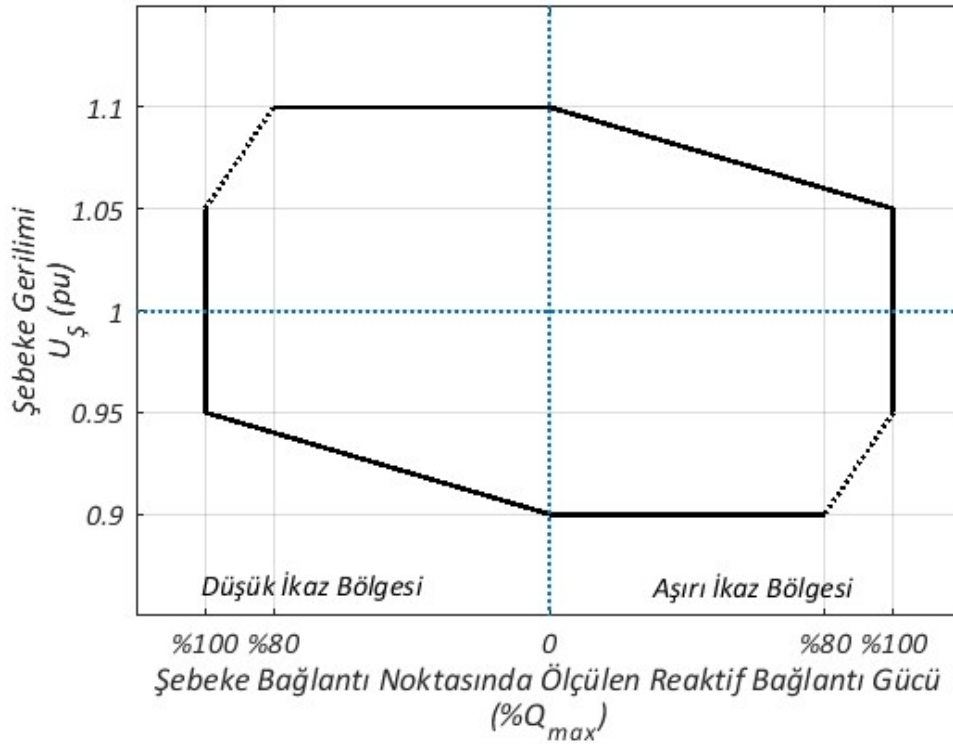
Bunun yanı sıra, yine EK -18 kapsamında yer alan ve sisteme reaktif güç desteği sağlanması ile alakalı kısımda, iletim sistemine bağlı üreticilerden bağlantı noktasının geriliminin denge durumu değişimlerine karşı Şekil 2.4'te verilen sınırlar dâhilinde sürekli olarak cevap vermeleri beklenir. Şekil 2.4 ile verilen çizim üzerinden tarif edilen %drop değişkeni, üreticinin yüzde reaktif güç değişimi ile bağlantı noktası için ayarlanan gerilim değerinin yüzde gerilim değişimi arasındaki değişimi ifade eder. Bu değer TEİAŞ tarafından belirlenir ve %2 ile %7 arasında değişebilmektedir. EK-18 kapsamı dışında kalan konvansiyonel üreticiler ile alakalı uyulması gereken kriterler, ilgili yönetmeliğin ikinci kısım, üçüncü bölüm içeriğinde paylaşılmıştır.



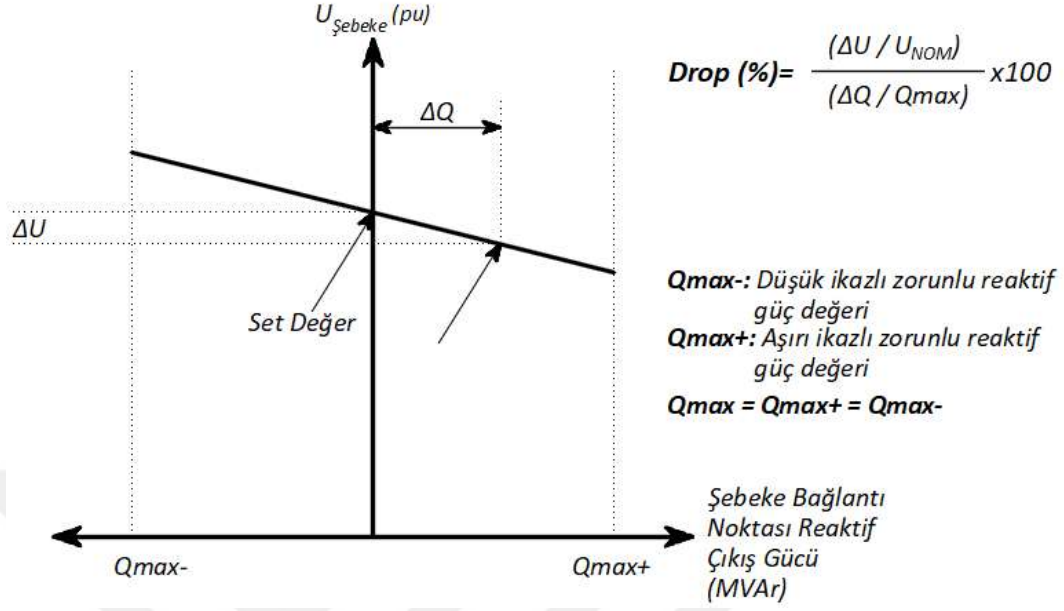
Şekil 2.3 Rüzgâr Santrali Reaktif Güç Kapasite Eğrisi



Şekil 2.4 Güneş Enerjisine Dayalı Fotovoltaik Üretim Tesisleri Reaktif Güç Kapasite Eğrisi



Şekil 2.5 Zorunlu Reaktif Güç Değerlerinin Bağlantı Noktası Gerilimine Bağlı Değişimi



Şekil 2.6 Santrallerin gerilim değişimlerine reaktif güç tepkisi

Elektrik Şebeke Yönetmeliği, üçüncü kısım, birinci bölümde, iletim sistemine bağlantı esasları ile ilgili çeşitli kısıtlar belirtilmektedir. Bu kısıtlara göre, TEİAŞ'ın bir dağıtım barasına veya bu baraya bağlı bir dağıtım sistemine bağlanacak üretim tesisinin/tesislerinin kurulu gücünün 50MW'ı geçemeyeceği belirtilmiştir (Madde 33 – 2. fıkra) [25]. Yine söz konusu maddenin devamında, bu kurulu gücün üzerindeki tesislerin bağlantısının iletim seviyesinden yapılmasının gerektiği belirtilmiştir. İlgili maddenin devamında bazı özel durumlar ve özel fider tahsisi ile ilgili detaylar verilmiştir.

### SİSTEM MODELLEMESİ VE YÖNTEM

Bir dağıtım şebekesine herhangi bir noktadan dâhil edilen dağıtık üretici, sistem içerisinde bağlandığı nokta ve etrafında gerilim artışlarına neden olur. Bu gerilim artışı, dağıtık üreticinin üretim kapasitesi ve bağlantı noktasının karakteristik özellikleri ile doğrudan ilgilidir. Sisteme dâhil edilen DÜ kapasitesi arttıkça sistem baralarındaki gerilimler de, bağlantı noktasının karakteristik özelliklerine bağlı olarak artar [9].

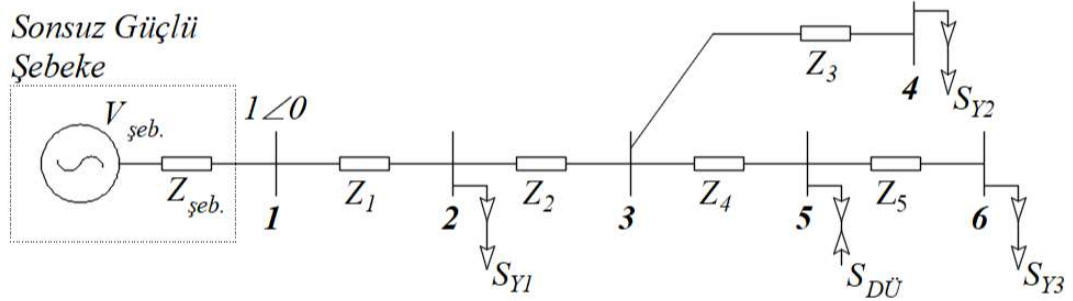
Güç sistemlerinde, sistem bileşenlerini ve sisteme bağlı tüketicileri, sistemde yaşanabilecek yüksek gerilim sapmalarından koruyabilmek için yasal düzenlemeler ile alt ve üst gerilim sınırları belirlenmiştir [25]. Buna bağlı olarak sistemin işletilmesinde, alt ve üst gerilim sınırları ile tanımlanan izin verilebilir gerilim aralığına uyulması zorunludur. Sorunsuz çalışmakta olan bir sisteme, herhangi bir noktadan bir dağıtık üretici dâhil edilmesi ardından sistemde düşük gerilimlerin yaşanması beklenmemesine karşın aşırı gerilimler meydana gelebilmektedir. Bu nedenle dağıtık üretim planlamalarında, olası aşırı gerilimlerin sorunlarına yönelik önlemlerin alınması gerekir.

Bu çalışmada, radyal bir güç sistemine herhangi bir noktadan, sistemde aşırı gerilim sorunlarına neden olmaksızın bağlanabilecek maksimum DÜ kapasitesinin bir matematiksel model üzerinden ifade edilmesi hedeflenmiştir. Literatür incelemesinde, aynı amaca sahip çalışmalara atıflar yapılmış ve bu çalışmalar neticesinde elde edilen matematiksel modellerin eksik yönlerine değinilmiştir. Bu bölümde, mevcut matematiksel modellerin türetilmesinde benimsenen yaklaşımlar ve kullanılan yöntemler daha detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Dikkate alınan matematiksel modeller

Şekil 3.1’de verilen, basit bir radyal güç sistem modeli üzerinden incelenmiştir. Böylece mevcut matematiksel modellerin eksiklikleri ve geliştirilebilir yönleri daha net bir şekilde ortaya konulmuştur.

### 3.1 Mevcut Matematiksel Modellerin İncelenmesi

Literatürdeki alternatif matematiksel modeller üzerinde gerçekleştirilecek incelemelerde kullanılacak güç sistemi modeli, sözkonusu çalışmalarda benimsenen yaklaşımlara uygun olacak şekilde belirlenmiştir. Şekil 3.1’de tek hat diyagramı verilen örnek güç sistemi, altı baralı radyal ve dallı bir yapıya sahip dengeli bir sistemdir. Tüm hatların havai iletkenler ile oluşturulduğu esas alınmıştır ve sistem bileşenlerinin kapasitif etkileri ihmal edilmiştir. Sistemde paralel bağlı kapasitelerin bulunmadığı kabul edilmiştir. Bara – 1 sonsuz güçlü bara olarak belirlenmiş ve gerilimi  $1\angle 0$  pu olarak alınmıştır. Bara – 5, DÜ bağlantı noktası olarak seçilmiştir. Sistemdeki 2, 4 ve 6 numaralı baralar yük baraları olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1 Matematiksel modellerin ön incelemelerinde esas alınan örnek güç sistemi modeli

#### 3.1.1 Matematiksel Model – 1 (MM - 1)

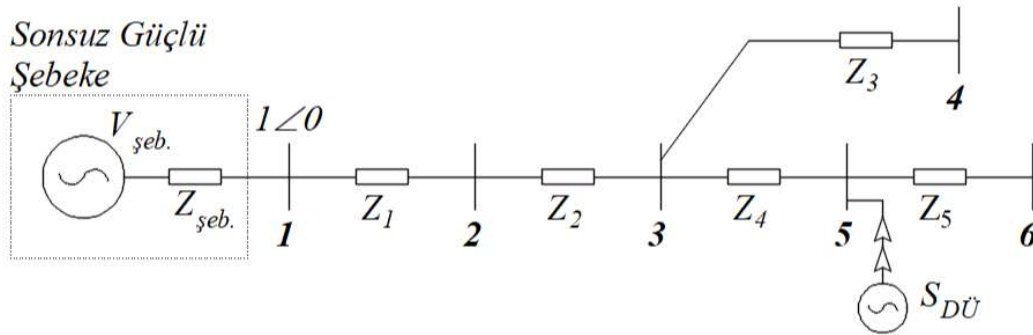
Literatür özetinde verilen matematiksel modeller arasında, [31] referansı ile verilen çalışmada, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabı için kolay uygulanabilirlikte ve işlevsel özellikte bir ifade elde edilmeye çalışılmıştır. Çalışmada önerilen matematiksel model, matematiksel modellerde benimsenen yaklaşımlara göre, daha fazla ihmal ve varsayım ile türetilmiştir.

Güç sistemleri, farklı görevlere ve yapıya sahip sistem bileşenlerinden ve farklı tüketim ve üretim profillerine sahip tüketiciler ile üreticilerden meydana gelmektedir. Bu



nedenle çok değişken ve doğrusal olmayan bir karaktere sahiptir. Sistem içerisinde bir noktaya ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin, sistemin her durumunda geçerli olabilecek kapsayıcılığa sahip olması gerekir. Dolayısıyla, DÜ bağlantısı sonrasında aşırı gerilimlerin oluşması bakımından en riskli sistem durumu belirlenerek, yapılacak incelemelerde bu durumun esas alınması temkinli bir yaklaşım olacaktır.

Sistemdeki yükler, çektikleri yük akımları nedeniyle gerilim düşümü oluştururlar. Üreticiler ise, sisteme sağladıkları akımlar nedeniyle, bağlı oldukları nokta ve etrafında gerilim artışına sebep olurlar. MM – 1 yaklaşımında, sisteme katılması planlanan DÜ birimi dışında, sistemde herhangi bir üreticinin bulunmadığı kabul edilmiştir. Bu şekilde kabul edilen bir sistem için, aşırı gerilimler açısından en riskli durumun, sistemin yüksüz durumu olduğu esas alınmıştır. Gerçekten de yüksüz bir sistemde, herhangi bir yük akımı çekilmemesi durumunda tüm baralardaki yükler sonsuz güçlü baranın gerilimine eşit olacaktır. En kötü durum senaryosu olarak adlandırılan bu çalışma durumu, bu bölümde incelenecek alternatif matematiksel modellerin tamamında temel olarak esas alınmıştır [31], [33]–[38]. Yüksüz sistem çalışması koşulunda, sistemde enerji kaynağı olarak sadece sonsuz güçlü bara bulunduğundan dolayı, bu baraya ait gerilim, sistemde olabilecek en yüksek gerilime karşılık gelir. Sistemdeki baraların alabilecekleri en yüksek gerilim değerlerini aldıkları yüksüz durum senaryosu, belirtilen şartlar altında, DÜ katılım sonrasında aşırı gerilime yol açmayacak güvenli kapasitenin belirlenebilmesi için esas alınabilecek en temkinli yaklaşımdır. Bu nedenle, Şekil 3.2 ile verilen modelde, 2,4 ve 6 baralarındaki yükler kaldırılarak, sistem üzerinde gerekli incelemeler gerçekleştirilir.



Şekil 3.2 Örnek güç sistemi modeline DÜ bağlantı gösterimi

DÜ bağlantısı sonrasında, sistemdeki gerilimlere ve hat akımlarına ilişkin ifadeler üzerinden DÜ bağlantı kapasitesi hesaplanabilir. En kötü durum senaryosu koşullarındaki güç sistemine, Bara – 5 üzerinden bir dağıtık üreticinin dahil edilmesi sonrasında oluşacak bağlantı noktası ve sonsuz güçlü bara gerimleri arasındaki fark ( $V_5 - V_1$ ), dağıtık üreticinin akımı ( $I_{DÜ}$ ) ve bu akımın izlediği güzergaha ait sistem empedansı ( $Z$ ) üzerinden ifade edilebilir.

$$V_5 - V_1 = I_{DÜ}Z \quad (3.1)$$

$$I_{DÜ} = \frac{V_5 - V_1}{Z} \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliği içerisinde verilen her bir değer, fazörel bir büyüklüğü ifade etmektedir. Yukarıdaki eşitlikler ve bundan sonra verilecek tüm eşitliklerde değişkenler per unit değerleri ile dikkate alınmaktadır ve mutlak değer içerisinde belirtilmedikçe, tüm değerler fazörel büyüklükleri ifade etmektedir. Bu durum esas alınarak, (3.2) eşitliği, genlikler ve faz açıları ile belirtilmek suretiyle tekrar düzenlendiğinde (3.3) eşitliği elde edilir.

$$I_{DÜ} = |V_5||Y|^{\angle\delta_5 - \theta} - |V_1||Y|^{\angle\delta_1 - \theta} \quad (3.3)$$

Burada  $\delta_1$  ve  $\delta_5$  sırasıyla, Bara – 1 ve Bara – 5 gerimlerine ait faz açılarını ifade etmektedir.  $Y$  söz konusu empedansın, admitans karşılığı ve  $\theta$  ise yine aynı empedansa ait faz açısıdır. (3.3) eşitliği ile elde edilen akım ifadesi ( $I_{DÜ}$ ) ve bağlantı barası gerilimi  $V_5$  kullanılarak sisteme dâhil edilen dağıtık üreticinin görünür gücü ( $S_{DÜ}$ ) hesaplanabilir.

$$S_{DÜ} = V_5 I_{DÜ}^* \quad (3.4)$$

DÜ bağlantı noktasından sisteme sağlanan akıma ait, eşitlik (3.4)'te elde edilen ifade yerine yazıldıktan sonra gerekli düzenlemeler yapıldığında,

$$S_{DÜ} = |V_5|^{\angle\delta_5} (|V_5||Y|^{\angle\theta - \delta_5} - |V_1||Y|^{\angle\theta - \delta_1}) \quad (3.5)$$

$$S_{DÜ} = |V_5|^2 |Y|^{\angle\theta} - |V_5| |V_1| |Y|^{\angle\theta + \delta_5 - \delta_1} \quad (3.6)$$

ifadeleri elde edilir. Eşitlik (3.6) gerçık ve imajiner bileşenlerine ayrıldığında, sırasıyla aktif ( $P_{DÜ}$ ) ve reaktif ( $Q_{DÜ}$ ) güç bileşenlerini verecektir.

$$P_{DÜ} = |V_5|^2 |Y| \cos\theta - |V_5| |V_1| |Y| \cos(\theta + \delta_5 - \delta_1) \quad (3.7)$$

$$Q_{DÜ} = |V_5|^2 |Y| \sin\theta - |V_5| |V_1| |Y| \sin(\theta + \delta_5 - \delta_1) \quad (3.8)$$

İncelenen sistemin yüksüz olduğu ve sistem üzerinde şönt yolların bulunmadığı göz önüne alındığında,  $Z$  empedansının, bağlantı noktasına ait Thevenin empedansına eşit olacaktır,  $Z = Z_1 + Z_2 + Z_4$ . Bu empedans değeri üzerinden  $Y$  admitansı elde edilebilir. Diğer taraftan, sonsuz güçlü baraya gerilimin genliği ( $|V_1|$ ) belirli bir değerde sabit tutulmaktadır. Gerçekleştirilecek çalışmalarda, bu gerilimin referans alınması suretiyle, ( $\delta_1$ ) açısı sıfıra eşitlenebilir. Elde edilecek matematiksel modelin maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesini hesaplayabilmesi için bağlantı noktasının gerilimi ( $V_5$ ) olabildiğince yüksek seçilmelidir. Bu nedenle bu gerilimin genliği, sistem üst gerilim sınırına eşit olarak alınmalıdır. Ancak bu gerilime ait faz açısı, sistemin detaylı analizleri çalışılmadan bilinemez.

Referans [31]'de benimsenen yaklaşımda sisteme bağlanacak DÜ birimin daima birim güç faktörü ile sisteme bağlandığının kabulü ile eşitlik (3.8)'de verilen reaktif güç ifadesi sıfıra eşitlenmiştir ve bağlantı noktası gerilimine ait bilinmeyen faz açısı, bilinen değişkenler ile ifade edilmiştir. Bu yaklaşıma ait çözüm adımları, aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

$$0 = |V_5|^2 |Y| \sin\theta - |V_5| |V_1| |Y| \sin(\theta + \delta_5 - \delta_1) \quad (3.9)$$

$$|V_5|^2 |Y| \sin\theta = |V_5| |V_1| |Y| \sin(\theta + \delta_5 - \delta_1) \quad (3.10)$$

$$\frac{|V_5|}{|V_1|} \sin\theta = \sin(\theta + \delta_5 - \delta_1) \quad (3.11)$$

$$\theta + \delta_5 - \delta_1 = \text{asin}\left(\frac{|V_5|}{|V_1|} \sin\theta\right) \quad (3.12)$$

Elde edilen ifade, eşitlik (3.7)'de yerine konulduğunda;

$$P_{DÜ} = |V_5|^2 |Y| \cos\theta - |V_5| |V_1| |Y| \cos\left(\text{asin}\left(\frac{|V_5|}{|V_1|} \sin\theta\right)\right) \quad (3.13)$$

eşitliği elde edilir. Eşitlik (3.13)'ün ikinci teriminde yer alan ters sinüs ifadesine ait gerilim genliklerinin oranının  $\left(\frac{|V_5|}{|V_1|}\right)$ ,  $\sin\theta$  ile çarpılması sonucunda elde edilecek sonucun, ters sinüs fonksiyonunda fazla bir etki oluşturmayacağı varsayımı ile gerilimler oranı 1'e eşit kabul edilmiştir. Aslında, bu varsayım ile sonsuz güçlü baranın gerilimi ile DÜ bağlantı barasının geriliminin faz açılarının eşit olduğu kabul edilmiştir. Diğer bir ifade ile DÜ bağlantı sonrasında, bağlantı noktası geriliminde sapmanın tamamen genlik boyutunda gerçekleştiği kabul edilmiş, bu gerilim sapmasının dikey bileşeni (enine gerilim sapması) ihmal edilmiş olur. Yukarıdaki yaklaşım benimsenerek gerçekleştirilen işlemler sonrasında, dağıtık üreticinin aktif gücü için elde edilen matematiksel model eşitlik (3.14)'teki gibidir.

$$|P_{DÜ}| = |V_5| |Y| (|V_5| - |V_1|) \cos(\theta) \quad (3.14)$$

Eşitlik (3.14), diğer denklemler gibi per unit tabanıdadır. Sonsuz güçlü bara sistemdeki tek güç kaynağıdır ve gerilimi 1 pu değerindedir. Sistemde herhangi bir şönt kapasite bulunmamaktadır. Bu şartlar altında, DÜ bağlantı noktası ile sonsuz güçlü bara arasındaki admitans yerine DÜ bağlantı noktasının kısa devre gücünün per unit ifadesi kullanılabilir. Gerçek değerleri ile birbirlerinden farklı olan bu iki ifade, per unit tabanında bu iki ifade genlik ve faz açısı olarak birbirlerine eşittirler. Güç sistemlerine ait karakteristik bir özellik olan bara kısa devre güçleri, uygun baz değerler üzerinden per unit değerinin elde edilmesi sonrasında, sistem admitansı ( $Y$ ) yerine kullanılması, uygulamalar açısından daha uygun olacaktır.

İncelenen matematiksel modelin (MM – 1 ) elde edilmesinde, kapasitesi hesaplanan dağıtık üreticinin, güç sistemine daima birim güç faktöründen dâhil edileceği kabul

edilmiştir. Buna göre DÜ görünür gücü sıfır faz açısında ve DÜ aktif gücü genliğinde olacaktır,  $S_{DG} = |P_{DG}| \angle 0^\circ$ . Örnek güç sistemine ait bir ifade olmasından ziyade, daha genel bir ifadenin elde edebilmesi amacıyla, sonsuz güçlü baranın gerilimini, güç sisteminde ait olduğu bölgenin nominal gerilimi olarak  $V_1 = V_n$  ile; DÜ birimin bağlantı noktası gerilimini ise  $V_{DÜ}$  ile tanımlandığında, eşitlik (3.15) ile verilen matematiksel model elde edilmiş olur.

$$|S_{DG}| = |V_{DÜ}| |S''_{DÜ}| (|V_{DÜ}| - |V_n|) \cos(\theta) \quad (3.15)$$

Matematiksel modelin türetilmesinde başvurulan varsayımlar ve ihmaller neticesinde kullanımı kolay, ancak, sadece belirli koşulların sağlanması durumunda işlevsel olabilecek bir matematiksel model elde edilmiştir.

Matematiksel modelin türetilmesi aşamasında, (3.7) ve (3.8) eşitliklerinde, bağlantı noktasına ait bilinmeyen faz açısının ( $\delta_5$ ) başka değişkenler üzerinden tanımlanabilmesi amacıyla, dağıtık üretim güç faktörünü birim değere sabitlemiştir. DÜ birimlerin güç sistemlerine birim güç faktöründe bağlanmalarına dair herhangi bir zorunluluk yoktur. Hâlbuki bir DÜ birimin, bir güç sistemine, birim güç faktörü ile katılımı, aynı kapasitede ileri güç faktörü ile gerçekleştirilen katılımdan daha fazla gerilim sapsasına neden olmaktadır [9]. Günümüzde dağıtık üreticilerin güç sistemlerine bağlantısında, 0.9 ileri ve 0.9 geri güç faktörleri aralığında izin verilebiliyor olması durumu, bu varsayımın kabul edilebilirliğine gerekçe olarak gösterilmiştir [33]. Hâlihazırda, günümüzde dağıtık üreticilere daha geniş bir aralıkta bağlantıya izin verilebilmektedir. Yakın gelecekte, sistem altyapılarının ve üretim kontrol tekniklerinin gelişmesi ile DÜ birimler için izin verilen güç faktörü aralığının genişlemesi beklenmektedir ve hatta DÜ birimlerin güç sistemlerine, faal bir şekilde yan hizmetler sunabilmelerinin dahi mümkün hale gelebileceği beklenmektedir [11]. Dolayısıyla, MM-1, sadece belirli koşulların geçerli olduğu bir planlamada kullanılabilmekte ve bu matematiksel modelin kullanılması ile elde edilen sonuçlar yapılan çalışma açısından yanıltıcı olabilmektedir.

### 3.1.2 Matematiksel Model – 2 (MM – 2)

Matematiksel Model – 2, mevcut modeller arasında en yaygın olarak başvurulan modeldir [33]–[37]. Bu matematiksel model, MM – 1 ‘den farklı olarak, DÜ birimin güç faktörünü hesaplamalara dâhil edebilmektedir. Şekil 3.1’de verilen örnek sistem modeli, MM – 2 türetilmesinde benimsenen yaklaşıma ait işlem adımları takip edilerek çalışılmıştır.

$$V_5 - V_1 = I_{DÜ} \cdot Z \quad (3.16)$$

Eşitlik (3.16)’daki DÜ bağlantı noktasından sisteme sağlanan akım değeri, dağıtık üreticinin güç bağıntıları üzerinden ifade edilebilir.

$$V_5 - V_1 = \frac{(P_{DÜ} + jQ_{DÜ})^*}{V_1^*} \cdot (R + jX) \quad (3.17)$$

$$V_5 - V_1 = \frac{(P_{DÜ}R + Q_{DÜ}X) + j(P_{DÜ}X - Q_{DÜ}R)}{V_1^*} \quad (3.18)$$

$$|V_1||V_5|^{\angle\delta_5 - \delta_1} - |V_1|^2 = (S_{DÜ}Z\cos\theta\cos\varphi + S_{DÜ}Z\sin\theta\sin\varphi) \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.19)’da görüldüğü gibi, DÜ bağlantı noktası geriliminin bilinmeyen faz açısı eşitliğin sol tarafında yer almaktadır. Bu açının değeri daha önce de belirtildiği üzere mevcut bir bilgi değildir ve çeşitli analizler neticesinde elde edilebilmektedir. Bu açının çok küçük bir değer olduğu varsayımıyla, gerçekleştirilecek hesaplamalarda fazla bir etkiye sahip olmadığının kabul edilerek ihmal edilmiştir. MM – 1’de olduğu gibi, bu matematiksel modelin türetilmesi aşamasında da DÜ bağlantı sonrasında bağlantı noktası geriliminin enine gerilim sapması ihmal edilmiştir. Yapılan ihmaller neticesinde (3.20), (3.21) ve (3.22) eşitlikleri elde edilmiştir.

$$|V_1|(|V_5| - |V_1|) = S_{DÜ} Z\cos(\theta - \varphi) \quad (3.20)$$

$$S_{DÜ} = \frac{|V_1||Y|(|V_5| - |V_1|)}{\cos(\theta - \varphi)} \quad (3.21)$$

$$S_{DÜ} = \frac{|V_n| |S''_{DÜ}| (|V_{DÜ}| - |V_n|)}{\cos(\theta - \varphi)} \quad (3.22)$$

Bazı durumlarda, enine gerilim sapması boyuna gerilim sapmasına kıyasla çok düşük olabilmektedir. Buna karşın yüksek R/X oranına sahip dağıtım şebekelerine, farklı güç faktörleri ile gerçekleştirilen DÜ katılımlarda enine gerilim sapmasının ihmal edilmesi yanıltıcı sonuçlar doğurabilmektedir. Bu durumun izahına ilerleyen bölümlerde yer verilecektir.

Denklem 3.17’de, DÜ birimin sisteme sağladığı akım, DÜ biriminin görünür gücü ile sonsuz güçlü bara geriliminin oranı üzerinden tanımlanmıştır. Dolayısıyla, MM – 2, sistemdeki güç kayıplarını dikkate almamaktadır. Bu kayıpların dikkate alınmaması, maksimum izin verilebilir DÜ kapasitenin gerçek maksimum değerinden daha düşük bir değer elde edilmesine sebep olmaktadır. Bu yönüyle MM – 2, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabında eksikliklere sahiptir.

### 3.1.3 Matematiksel Model – 3 (MM – 3)

Matematiksel model – 3, mevcut matematiksel modeller arasından gerçeğe en yakın sonuçlar veren yaklaşımdır [38]. Bir önceki matematiksel modelden farklı olarak (3.16) eşitliğinde verilen ifadenin sağ tarafında yer alan akım ifadesinde DÜ bağlantı noktasındaki gerilim değeri esas alınmıştır. Bu yaklaşım neticesinde elde edilen matematiksel model (3.23) eşitliği ile verilmiştir. Diğer tüm matematiksel modellerde olduğu gibi, bu matematiksel modelde de, DÜ bağlantı sonrasında bağlantı noktası gerilimindeki enine gerilim sapması ihmal edilmiştir ve hesaplamalara katılmamıştır.

$$S_{DÜ} = \frac{|V_{DÜ}| |S''_{DÜ}| (|V_{DÜ}| - |V_n|)}{\cos(\theta - \varphi)} \quad (3.23)$$

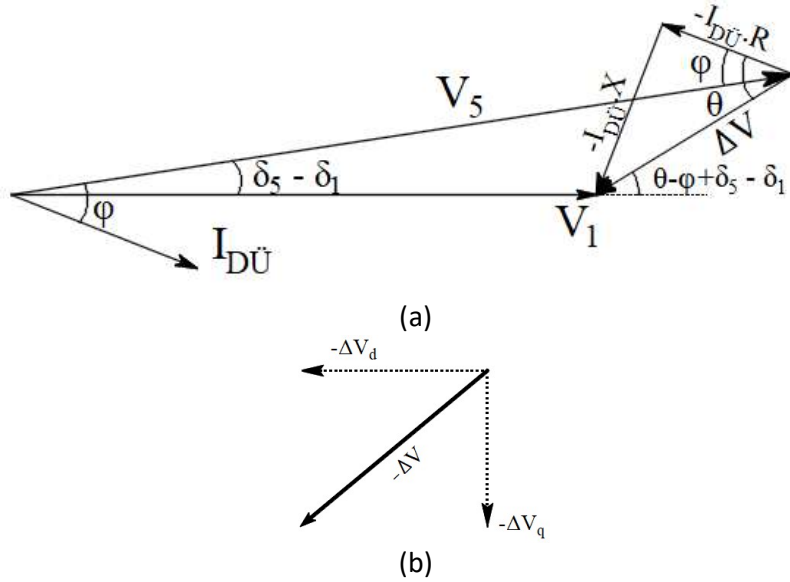
## 3.2 Yeni Matematiksel Modelin Geliştirilmesi

Yukarıda, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabı için önerilmiş olan mevcut matematiksel modeller incelenmiştir. İncelenen matematiksel modeller arasında MM – 3 en az varsayım ve ihmale dayalı olarak türetilen ve dolayısıyla gerçek

izin verilebilir maksimum DÜ bağlantı kapasitesine en yakın sonucu verebilecek matematiksel modeldir. Ancak diğer tüm matematiksel modellerde olduğu gibi, MM – 3'te de DÜ bağlantı sonrasında bağlantı noktası gerilimindeki enine gerilim sapması hesaplamalara dâhil edilmemiştir.

Çizelge 3-1 Literatürdeki mevcut matematiksel modellerin eksik yönleri

Matematiksel Model – 1	Matematiksel Model – 2	Matematiksel Model – 3
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dağıtık üreticilerin sadece birim güç faktöründe sisteme bağlandıklarını kabul edilmiştir.</li> <li>• Enine gerilim sapması ihmal edilmiştir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hat kayıpları ihmal edilmiştir.</li> <li>• Enine gerilim sapması ihmal edilmiştir.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enine gerilim sapması ihmal edilmiştir.</li> </ul>



Şekil 3.3 (a) Sonsuz güçlü bara ve DÜ bağlantı noktası gerilimleri için fazörel diyagram, (b) Gerilim düşümü fazörüne ait bileşenler

Söz konusu gerilim sapması, DÜ katılım sonrasındaki sistem gerilimlerinin ve gerilim sapmasının fazörleri ile oluşturulan fazör diyagramı üzerinden incelenebilir, Şekil 3.3 (a). Gerilim sapmasının, enine ve boyuna gerilim sapması olarak, iki ayrı bileşeni bulunmaktadır, Şekil 3.3 (b), ve bu bileşenlere ait matematiksel ifadeler aşağıdaki gibidir.



$$\Delta V = \Delta V_d + j\Delta V_q \quad (3.24)$$

$$\Delta V_d = IR\cos\varphi + IX\sin\varphi$$

$$\Delta V_d = IZ\cos(\theta + \varphi) \quad (3.25)$$

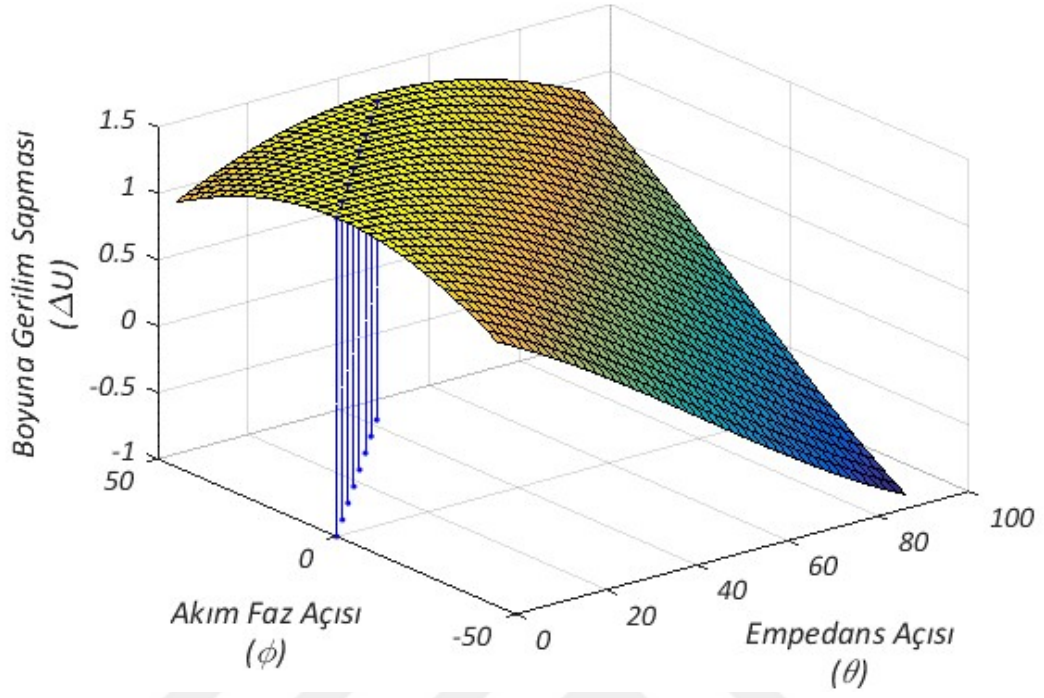
$$\Delta V_d = \Delta U = |\Delta V|\cos(\theta + \varphi)$$

$$\Delta V_q = IX\cos\varphi - IR\sin\varphi$$

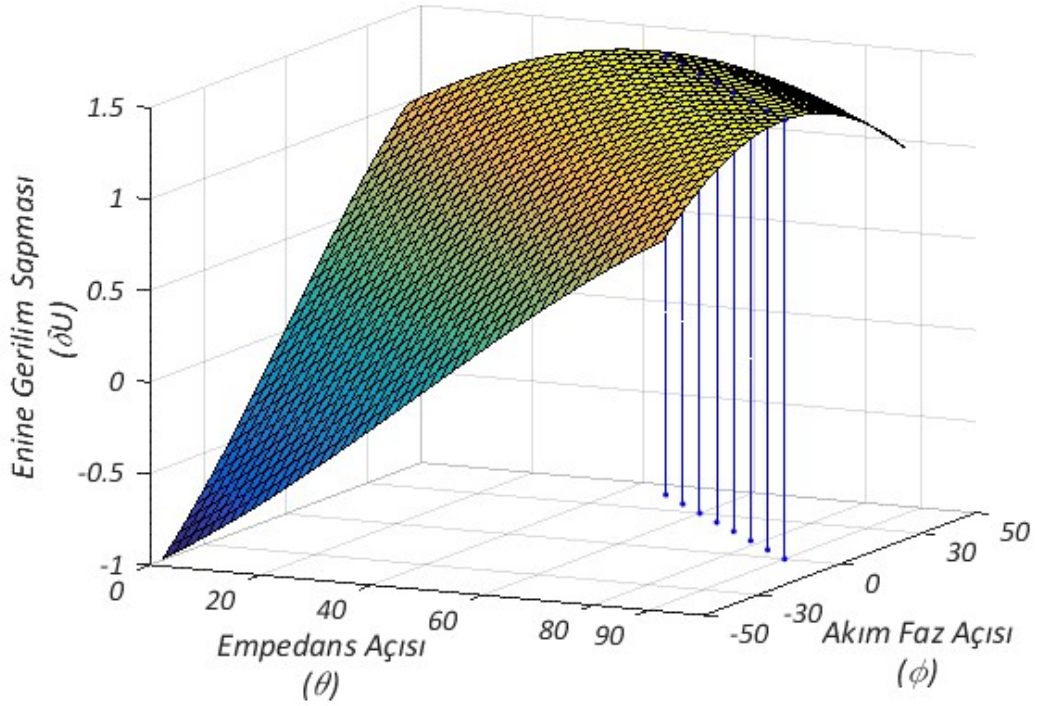
$$\Delta V_q = IZ\sin(\theta + \varphi) \quad (3.26)$$

$$\Delta V_q = \delta U = |\Delta V|\sin(\theta + \varphi)$$

Görüldüğü üzere, enine ve boyuna gerilim saptması sistem empedansına ve DÜ birimin sisteme sağladığı akıma bağlıdır. Elde edilen denklemlerde, empedans ve akımın faz açıları oldukça önemli rol oynamaktadırlar. İletim sistemlerindeki düşük R/X oranı ve güç faktörünün birim değere yakın aralıklarda seçilmesi neticesinde,  $(\theta + \varphi)$  açısı  $90^\circ$ 'ye yakın bir değer alır. İletim seviyelerinde gerilim değerlerinin yüksek olması ve akımın olabildiğince düşük tutulmasına yönelik yaklaşım sonucu enine gerilim saptması ihmal edilebilir değerle alabilmektedir. Dağıtım şebekelerinde ise durum farklıdır. Gerilimler iletim seviyelerindeki değerlere göre düşük akımlar ise daha yüksek olabilmektedir. Diğer taraftan, dağıtım şebekelerinde  $R/X$  oranı iletim şebekelerine kıyasla daha büyüktür [62], [63]. Ancak, gelişen sistem altyapıları ve üretim teknolojileri yardımıyla sisteme farklı güç açıları ile katılımın önünün açılması sonucunda  $(\theta + \varphi)$  açısı daha geniş bir aralıkta değerler alabilecektir. Dolayısıyla, dağıtım seviyelerinden sisteme katılımlarda  $(\theta + \varphi)$  açısının  $90^\circ$ 'ye yaklaşan değerleri söz konusu olabilir ve gerilim saptmasının değeri, dağıtım seviyelerindeki gerilimlerin yanında ihmal edilemeyecek kadar yüksek değerler alabilir. Böyle durumlarda enine gerilim saptmasının ihmalı doğru bir yaklaşım olmayabilir. Boyuna ve Enine gerilim saptmasının sistem empedansı faz açısı  $\theta$  ve akım faz açısı  $\varphi$  değişimlerine göre davranışı sırasıyla Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'te verilmiştir. Yine aynı şekillerde bu iki gerilim saptmalarına ait maksimum değerlerinin iz düşümleri verilmiştir.



Şekil 3.4 Boyuna gerilim sapmasının sistem empedansı faz açısı  $\theta$  ve akım faz açısı  $\varphi$  değişimlerine göre davranışı



Şekil 3.5 Enine gerilim sapmasının sistem empedansı faz açısı  $\theta$  ve akım faz açısı  $\varphi$  değişimlerine göre davranışı

DÜ planlamalarda katılım koşullarına bağlı olmaksızın, tüm durumlarda kullanılabilir ve daima doğru sonuçlar verebilecek bir matematiksel modelin geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu amaçla, aşağıdaki yaklaşım esas alınarak yeni bir matematiksel model önermesi yapılmıştır.

Sonsuz güçlü bara ve DÜ bağlantı barası gerilim fazörleri arasındaki faz açısı Şekil 3.3.(a)'da verilen fazörel diagram üzerinden tanımlanabilir. Gerilim fazörleri üzerinden oluşan üçgende sinüs teoremi uygulanarak, faz açıları ve genlikler arasındaki ilişki, eşitlik (3.26)'daki gibi elde edilebilir.

$$\frac{|V_1|}{\sin(\theta + \varphi)} = \frac{|V_5|}{\sin(180 - \theta - \varphi - \delta_5 + \delta_1)} \quad (3.27)$$

$$\frac{|V_1|}{\sin(\theta + \varphi)} = \frac{|V_5|}{\sin(\theta + \varphi + \delta_5 - \delta_1)}$$

$$\frac{|V_5|}{|V_1|} \sin(\theta + \varphi) = \sin(\theta + \varphi + \delta_5 - \delta_1) \quad (3.28)$$

$$\delta_5 - \delta_1 = \sin^{-1} \left[ \frac{|V_5|}{|V_1|} \sin(\theta + \varphi) \right] - \theta - \varphi \quad (3.29)$$

Ele alınan örnek sistem modeline ait fazör çizimlerinden elde edilen (3.29)'daki ifadeyi genelleştirmek amacıyla  $|V_1| = V_n$  ve  $|V_5| = V_{DÜ}$  gösterimleri kullanılır ve (3.7) ile (3.8) eşitliklerinde yerine yazılırsa kullanılırsa aşağıdaki bağıntılar oluşturulabilir.

$$P_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \cos \theta - |V_{DÜ}| |V_n| |Y| \cos \left( \sin^{-1} \left[ \frac{|V_{DÜ}|}{|V_n|} \sin(\theta + \varphi) \right] - \varphi \right) \quad (3.30)$$

$$Q_{DÜ} = |V_{DÜ}|^2 |Y| \sin \theta - |V_{DÜ}| |V_n| |Y| \sin \left( \sin^{-1} \left[ \frac{|V_{DÜ}|}{|V_n|} \sin(\theta + \varphi) \right] - \varphi \right) \quad (3.31)$$

Elde edilen denklemler düzenlenerek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi kapasitesinin görünür güç ifadesi (3.34)'te gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$k = \frac{|V_{DÜ}|}{|V_n|} \quad (3.32)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{|V_{DÜ}|}{|V_n|} \sin(\theta + \varphi) \right) - \varphi \quad (3.33)$$

$$|S_{DG}| = \frac{|V_n| |S''_{DÜ}|}{\cos \varphi} (k^2 \cos \theta - k \cos \alpha) \quad (3.34)$$

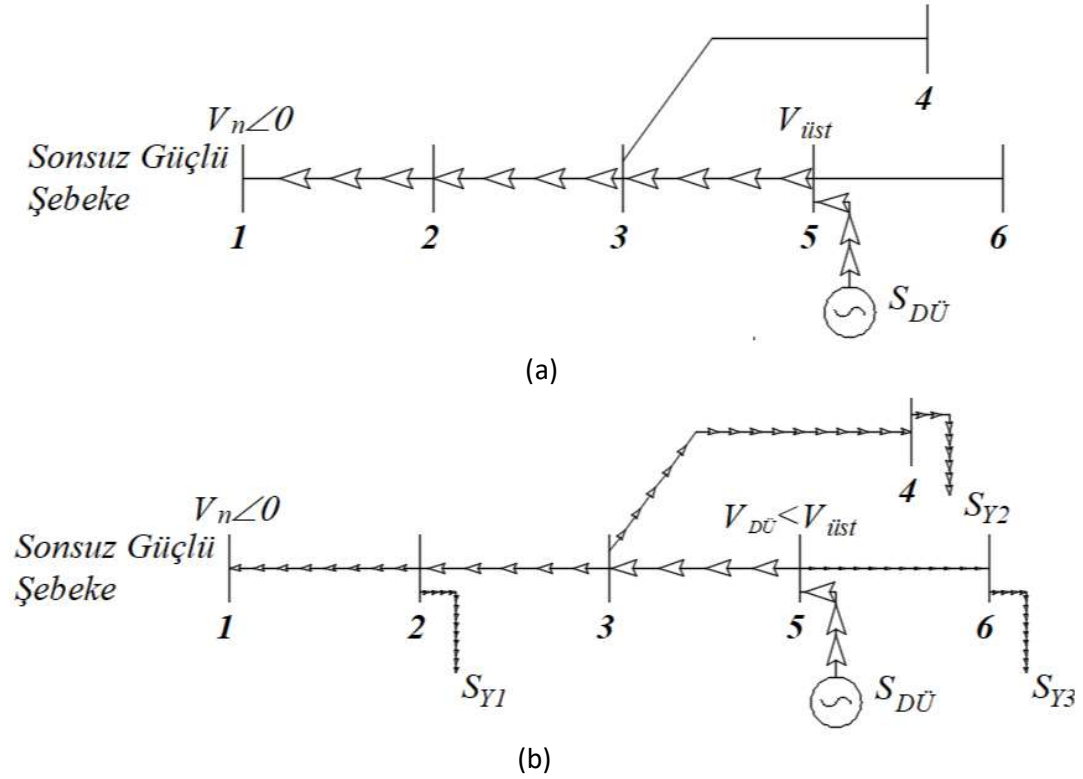
### 3.3 Sistemdeki Yüklerin ve Üreticilerin Dikkate Alınması

Literatürde önerilen matematiksel modeller ve tez çalışmasında önerilen matematiksel model (3.34), sistemin yüksüz çalışma durumu esas alınarak türetilmişlerdir. Ancak gerçek uygulamalarda, güç sistemlerinin yüksüz çalışmaları pek olası bir durum değildir. Ayrıca günümüzde dağıtık üretim oldukça fazla bir şekilde rağbet görmektedir. Hâlihazırda güç sistemlerinde yaygın bir şekilde yer alan dağıtık üretim tesislerinin, ilerleyen zaman içerisinde daha da yaygınlaşması beklenmektedir. Yüklerin ve sistemdeki üreticilerin DÜ planlamalarda dikkate alınması ile daha genel uygulanabilirlikte modeller elde edilerek daha doğru sonuçlara ulaşılabilecektir.

Yapılan çalışmalar, önceki bölümlerde bahsedildiği gibi, sistemde aşırı gerilim sorunlarına neden olmayacak maksimum DÜ bağlantı kapasitesinin belirlenebilmesine yönelik matematiksel modellerin önerilmesi üzerinedir. Sistemde sonsuz güçlü bara olarak esas alınan nokta, genelde sistemin ilgili bölümünde nominal gerilim seviyesine sahip noktalarlardır. Aşırı gerilim oluşturmayacak maksimum DÜ bağlantı kapasitesi ise ancak ve ancak, DÜ birimin, izin verilebilir üst gerilim seviyesinde sisteme bağlanması ile elde edilebilmektedir. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabında, bu esasların dikkate alınması ile bu iki noktanın gerilim genlikleri hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Ancak sistemde yüklerin olduğu durumda, DÜ birimin ürettiği enerjinin tamamı sonsuz güçlü şebekeye aktarılamaz. Üretilen enerjiden, yük taleplerinin ve sistem kayıplarının karşılaması sonrasında, arta kalan miktarda enerji sonsuz güçlü şebekeye iletilir. DÜ birimin bağlı olduğu noktadan sisteme sağlanan akım, sisteme bağlı yükleri beslemek üzere, dağılarak ve genliği, yüklerin bağlı olduğu noktalarda azalarak sonsuz güçlü baraya doğru akmaktadır. Bu nedenle, söz konusu iki nokta arasındaki gerilim farkının açıklanabilmesi oldukça zordur.

Daha iyi bir anlatım elde edebilmek amacıyla örnek güç sistemi modeline dönecek olursak; sistemin yüklü ve yüksüz durumuna ait DÜ bağlantısı sonrasındaki güç akışına ait görseller Şekil 3.5'te verilmiştir. Sistemin yüksüz durumu için hesaplanan maksimum izin verilebilir bağlantı kapasitesinde bir DÜ biriminin, sisteme 5. baradan bağlandığı durum için güç akışı Şekil 3.5 (a) ile verilmiştir. Yine aynı kapasitede bir DÜ biriminin, sistemdeki yükler devrede iken aynı baradan sisteme dâhil edildiği duruma ilişkin güç akışı, Şekil 3.5 (b) deki gibi görselleştirilmiştir. Görüldüğü üzere, yüksüz durumda, DÜ biriminin güç sistemine sağladığı akımın tamamı tek bir güzergâh boyunca eksilmeden, Bara – 5'ten Bara – 1'e doğru akmaktadır. İki nokta arasındaki gerilim farkının genliği ve akım yolunun empadansı bilinmektedir. Ohm kanunu çerçevesinde, bu iki değer ile akım arasında matematiksel bir bağıntı kurulabilir.



Şekil 3.6 (a) DÜ bağlantı sonrası yüksüz durum için, (b) DÜ bağlantı sonrası yüklü durum için güç akışı görselleri

Yüklü durumda ise (Şekil 3.5 (b)), DÜ bağlantı noktasından çıkan akım, yük taleplerini sağlayacak şekilde çeşitli güzergahlar üzerinde dağılmıştır. Yük besleme akımlarının sağlanmasından sonra arta kalan miktarda akım sonsuz güçlü şebeke barasına doğru

akmaktadır. Dolayısıyla, referans gerilim noktası olan sonsuz güçlü bara ile DÜ bağlantı noktası arasında oluşan gerilim sapması hakkında fikir yürütebilmek oldukça zordur. Hangi akım yolundan ne kadar akımın akmakta olduğunun tespiti, ancak güç akış analizleri ile belirlenebilir ve bu analizler sonrasında elde edilen sonuçlar kullanılarak, bağlantı noktası gerilimini üst gerilim sınırına çıkarabilecek kapasite ile ilgili bir çıkarımda bulunulabilir. Bu tez çalışmasının amacı, zorlu matematiksel işlemlere ve zaman alıcı hesaplamalara gerek bırakmaksızın, maksimum izin verilebilir kapasitenin hesabı için bir matematiksel modelin oluşturulmasına yöneliktir. Mevcut modeller, içerdikleri ihmaller nedeniyle, bu kapasitenin hesaplanabilmesi için yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle yeni bir yaklaşımın benimsenmesi ve ilgili kapasitenin hesabına yönelik yeni bir matematiksel modelin geliştirilmesi bir zorunluluk teşkil etmektedir. Bu aşamada, sistem yüklerinin ve üreticilerinin sorunun çözümüne uygun bir şekilde dahil edilebileceği yeni bir sistem senaryosunun belirlenmesi doğru bir başlangıç olarak düşünülmektedir.

DÜ bağlantı sonrası sistemde aşırı gerilimlerin oluşması açısından en riskli durum olarak öngörülen yüksüz durumun, gerçek uygulamalarda fazla karşılık bulamayacağı hakkında gerekçeli izahat yapılmıştı. Dinamik yüklerin ve üreticilerin bulunduğu bir sistem için, DÜ bağlantı öncesinde sistem baralarında en yüksek gerilim seviyelerinin oluştuğu durum, DÜ bağlantı sonrasında aşırı gerilimlerin oluşması bakımından en riskli durumu teşkil edecektir. Sistemdeki yükler, çektikleri akımlar ile bağlı oldukları noktaların gerilimlerini düşülmektedir. Diğer taraftan sistemdeki üreticiler ise, sisteme sağladıkları akımlar ile bağlı oldukları nokta ve etrafında gerilimleri yükseltmektedir. Dolayısıyla, minimum tüketimin ve maksimum üretimin eş zamanlı olarak gerçekleştiği durum en kötü senaryo olarak esas alınması doğru bir yaklaşım olacaktır. Bu senaryo literatürde yapılan çeşitli çalışmalarca kabul görmüş ve hatta güç sistemi operatörleri tarafından, sistem bileşenlerinin ve sistemdeki tüketicilerin aşırı gerilimlerden zarar görmeyeceklerinden emin olabilmek amacıyla gerçekleştirdikleri analizlerde dikkate aldıkları durum senaryolarından birisi olarak ortaya konulmuştur [64].

Sistem içerisinde, çeşitli noktaların yeterli örnekleme oluşturabilecek kadar izlenmesi neticesinde, sürekli devrede olan taban yüklerin tespiti yapılabilmektedir. Bu tespitler neticesinde, sistemdeki minimum tüketim anına ait yük dağılımları belirlenebilmektedir. Üreticilerin sisteme sağladıkları gücün miktarı arttıkça, sistem baralarında neden

oldukları gerilim artışı çoğalacaktır. Bu nedenle sistemdeki üreticilerin değerlendirilmesinde, bu tesislerin kurulu güçlerinin esas alınması doğru bir yaklaşım olacaktır.

Sistemin yüksüz çalışma durumunun değerlendirilmesi aşamasında, sonsuz güçlü şebeke barası ile DÜ bağlantı noktası olmak üzere, sistem içerisinde iki noktaya ait akım ve gerilim bilgileri üzerinden gerekli tanılamalar yapılabilmektedir. Minimum tüketim ve maksimum üretim bilgilerine sahip olunan bir sistemin değerlendirilmesinde ise, yüklerin ve üreticilerin sistem içerisinde bağlı oldukları noktalar düşünüldüğünde, yapılacak incelemelerin birçok sistem noktasının dikkate alınması ile gerçekleştirilebileceği anlaşılmaktadır. Ancak, yüklerin ve üreticilerin sistemde bağlı oldukları noktalara ait akım ve gerilim bilgileri kesin olarak bilinmemektedir. Bu durum yapılacak analizleri zorlaştıracığından dolayı, sistemi iki baralı eşdeğerine indirgenmesi uygun görülmüştür. Böylece, yüksüz çalışma durumunun incelenmesinde benimsenen yaklaşımlar, yüklü ve üreticili sistemin incelenmesi aşamasında tekrarlanabilir. İndirgeme sonrasında elde edilen iki baralı eşdeğer devrede, baralardan biri sonsuz güçlü şebeke barası ve diğeri ise DÜ bağlantı noktası olmalıdır. Elde edilecek eşdeğer devrede, ilk başta DÜ bağlantı noktası için, sistemin yüksüz çalışma durumu esas alınarak hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değeri belirlenir ve sonrasında sistemdeki yüklerin ve üreticilerin, bu kapasite üzerindeki etkileri dikkate alınarak, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi uyarlanabilir. Doğru değere ulaşabilmek için, bu eşdeğer yük ve üretici değerlerinin uygun ve olabildiğince doğru bir şekilde hesaplanabilmesi gerekmektedir. Bunun için literatürde kabul görmüş ağ indirgeme teknikleri kullanılabilir.

Literatürde birçok ağ indirgeme yöntemi bulunmaktadır. Bunlar kendi aralarında kullanıldıkları çalışmalara uygunlukları açısından dinamik ve statik indirgeme teknikleri olarak ikiye ayrılmaktadır [65]. Literatürde en çok bilinen ve yaygın olarak kullanılan ağ indirgeme yöntemleri; Ward, Kron, Dimo's ve Zhukov's yöntemleridir. Bu yöntemlerden Ward ve Kron yöntemleri, statik çalışmalara daha fazla uygunluk göstermektedirler ve DÜ planlama çalışmaları için daha uygulanabilir yöntemler olarak sıralanmaktadır. Ağ indirgeme yöntemleri hakkında genel bir giriş ve Ward ve Kron indirgeme yöntemlerinin incelenmesi aşağıdaki bölümde verilmiştir.

### 3.3.1 Ağ indirgeme teknikleri

Ağ indirgeme teknikleri, birçok disiplin tarafından kullanılmakta olan ve yapılacak çalışmalarda işlem hacminin azaltılması amacıyla başvurulan yöntemlerdir. Özgün sistem, iç ve dış sistem olarak iki kısma ayrılır. İç sistem, yapılacak çalışma açısından önemli noktalardan oluşan sisteme karşılık gelir. Dış sistem ise, yapılacak çalışma açısından fazla öneme sahip olmayan ve yapılacak çalışmayı etkilemeyecek noktalardan oluşan sistemi ifade eder. Ağ indirgeme teknikleri, yapılacak çalışma açısından sisteme ait herhangi bir bilginin kaybına veya farklılaşmasına neden olmaksızın, sistemin daha düşük boyutta bir eşdeğerinin elde edilmesini sağlar. Böylece yapılacak çalışmalar daha az çaba ve daha az zaman kaybı ile gerçekleştirilebilir.

#### 3.3.1.1 Ward İndirgeme Yöntemi

Ward indirgeme yöntemi, sistemin düğüm denklemlerinin, Gauss eleme yöntemleri yardımıyla boyut olarak azaltılması ve dolayısıyla daha küçük eşdeğer bir sistemin elde edilmesi esasına dayanmaktadır [66]. Bu yöntemde yükler, sabit akım modelleri ile dikkate alınır. Yöntemin uygulanmasında takip edilecek işlem adımları aşağıda verildiği gibidir.

$$I = YV \quad (3.35)$$

$$I(i) = \frac{S^*(i)}{V^*(i)} \quad (3.36)$$

(3.35) eşitliği ile verilen düğüm denklemlerinde, akım vektörü,  $I$ , (3.36)'da verilen ifade ile, sistemin belirli bir durumuna ait çözümünden elde edilen ilk değerler üzerinden hesaplanır. Ward ağ indirgeme tekniği kullanılarak,  $n$  adet baraya sahip bir güç sistemi,  $m$  tane seçilmiş baranın elenmesi ile  $n - m$  baralı bir sisteme indirgenebilir. Sistemden  $k$ 'nıncı baranın elenmesi için sırasıyla (3.37) ve (3.38) ile verilen adımlar uygulanarak işlemler gerçekleştirilir.

$$Y'_{ij} = Y_{ij} - \frac{Y_{ik}Y_{kj}}{Y_{kk}}; \quad i, j = 1, 2, \dots, n; \quad i, j \neq k \quad (3.37)$$



$$I'(i) = I(i) - \frac{Y_{ik}}{Y_{kk}} I(k) \quad (3.38)$$

Gösterimlerin üzerindeki kesme işaretleri (') o ifadenin  $k$ 'ninci bara kaldırıldıktan sonraki eşitliğini ifade eder. Sistemden  $k$ 'ninci bara kaldırıldıktan sonra,  $Y$  matrisinin boyutu  $(n - 1) \times (n - 1)$ , akım vektörünün,  $I$ , boyutu ise  $(n - 1) \times 1$  olur.

### 3.3.1.2 Kron İndirgeme Yöntemi

Bu indirgeme yönteminde, yapılacak çalışma açısından önemsiz noktadaki yükler, sabit empedanslar olarak modellenir ve bu şekilde güncellenen yeni admitans matrisi üzerinden işlemler gerçekleştirilir. Sistemdeki önemsiz noktalardaki yüklerin empedans eşdeğerleri, admitans matrisinde o noktaya ait satırdaki köşegen elemanına eklenir. Böylece bu nokta pasifleştirilerek akımı sifıra eşitlenmiş olur [65]. Sistemdeki  $k$ 'ninci nokta için admitans matrisinde ilgili satırın köşegen elemanına eklenecek değer (3.39)'da verilen bağıntı ile elde edilebilir.

$$Y_{kk} = -(P_{YÜKk} - jQ_{YÜKk})/V_k^2 \quad (3.39)$$

### 3.3.2 Örnek Güç Sistemine İndirgeme Yönteminin Uygulanması

Yapılacak çalışmanın amacı, sistemdeki yüklerin ve üreticilerin bağlantı noktasına indirgenmesini sağlayarak, örnek güç sisteminde yüklerin ve üreticilerin bağlı bulunduğu durumun, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi incelemelerinde, sistemin yüksüz çalışma durumunda uygulanan yöntemlere uygun hale getirilmesidir. Yukarıda incelenen Ward ve Kron indirgeme yöntemleri dikkate alındıklarında, Ward yönteminin yapılacak çalışmalar açısından daha uygun olduğu öngörülmüştür. Kron yönteminde, sistemdeki yükler, sabit empedanslar şeklinde dikkate alındıklarından dolayı gerçekleştirilecek indirgeme sonrasında elde edilecek bilginin, yapılacak çalışma açısından bir mahiyeti olmayacaktır.

Sistemdeki bir yükün veya bir üreticinin, sistem gerilimleri üzerindeki etkisi farklı olacağından dolayı, bu iki bileşenin incelenmesinin kademeli olarak yapılması daha uygun olacaktır. Üreticiler, sistem noktalarındaki gerilimleri artıracaklarından dolayı

sistem kısıtlaması olarak üst gerilim sınırının dikkate alındığı bu çalışmada, üreticilerin, yüklerin değerlendirilmesinden sonrasında elde edilen bulguların yorumlanması ile hesaplamalara katılması uygun görülmüştür. Bu nedenle örnek sistemin indirgenmesinde, ilk aşama olarak, Şekil 3.1’de verilen sistemin yüklü durumu esas alınacaktır.

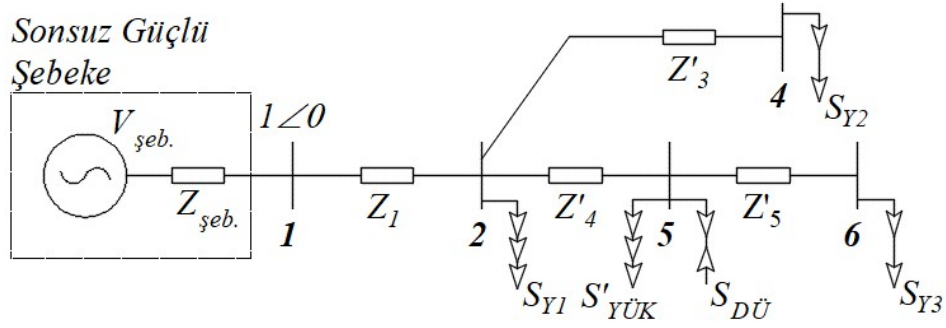
Ele alınan güç sistemi için, DÜ birimin sisteme bağlı olmadığı duruma ait düğüm denklemleri, per unit tabanında değerler üzerinden tanımlanacak şekilde (3.40)’da verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + Y_2 & -Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_2 & Y_2 + Y_3 + Y_4 & -Y_3 & -Y_4 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_3 & Y_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y_4 & 0 & Y_4 + Y_5 & -Y_5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -Y_5 & Y_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Örnek güç sisteminde, sonsuz güçlü baranın ve DÜ bağlantı noktasının gerilimleri, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi analizlerinde kullanılacaktır. Bu nedenle altı baralı örnek güç sistemi, Ward indirgeme yöntemi yardımıyla, Bara – 1 ve Bara – 5’ten oluşan eşdeğerine indirgenecektir.

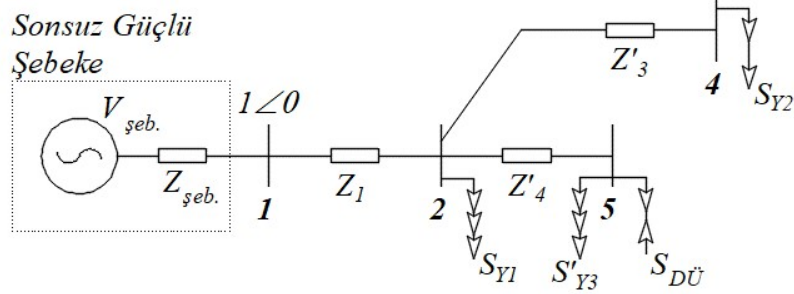
İşlem adımlarının daha sağlıklı takip edilebilmesi amacıyla, kaldırılması planlan baralar adım adım sistemden kaldırılmıştır. İlk olarak, sistemde herhangi bir yükün bağlı bulunmadığı, bağlantı barası özelliğindeki Bara – 3 ve sonrasında diğer baraların kaldırılması işlemleri sırasıyla (3.41), (3.42),(3,43) ve (3.44) eşitliklerinde verildiği şekilde gerçekleştirilmiştir. Düğüm denklemlerinden kaldırılan her bir bara sonrasında sistem yapısının nasıl değiştiği ise Şekil 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10 ile gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + \frac{Y_2(Y_3 + Y_4)}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_2 Y_3}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & 0 \\ 0 & \frac{-Y_2 Y_3}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{Y_3(Y_2 + Y_4)}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_3 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & 0 \\ 0 & \frac{-Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_3 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & Y_5 + \frac{Y_4(Y_2 + Y_3)}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & -Y_5 \\ 0 & 0 & 0 & -Y_5 & Y_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$



Şekil 3.7 Örnek güç sisteminde 3 numaralı baranın kaldırılması sonrasında elde edilen eşdeğer sistem

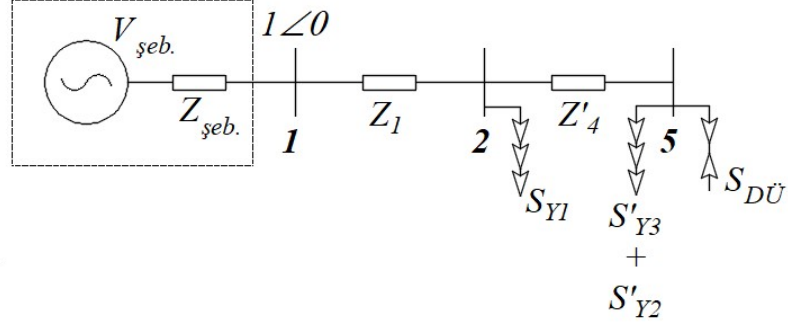
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_4 \\ I_5 + I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + \frac{Y_2(Y_3 + Y_4)}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_2 Y_3}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ 0 & \frac{-Y_2 Y_3}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{Y_2(Y_3 + Y_4)}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_3 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} \\ 0 & \frac{-Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{-Y_3 Y_4}{Y_2 + Y_3 + Y_4} & \frac{Y_4(Y_2 + Y_3)}{Y_2 + Y_3 + Y_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_4 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$



Şekil 3.8 Örnek güç sisteminde 3 ve 6 numaralı baraların kaldırılmaları sonrasında elde edilen eşdeğer sistem

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 + \frac{Y_2}{Y_2 + Y_4} I_4 \\ I_5 + \frac{Y_4}{Y_2 + Y_4} I_4 + I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 & -Y_1 & 0 \\ -Y_1 & Y_1 + \frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4} & \frac{-Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4} \\ 0 & \frac{-Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4} & \frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

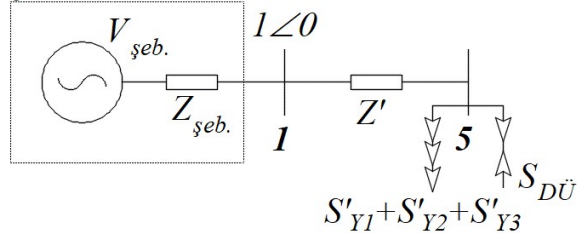
Sonsuz Güçlü  
Şebeke



Şekil 3.9 Örnek güç sisteminde 3, 6 ve 4 numaralı baraların kaldırılmaları sonrasında elde edilen eşdeğer sistem

$$\begin{bmatrix} I_1 + \frac{Y_1}{Y_1 + \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)} I_2 \\ I_5 + \frac{Y_2 Y_4 / Y_2 + Y_4}{Y_1 + \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)} I_2 + \frac{Y_4}{Y_4 + \left(\frac{Y_1 Y_2}{Y_1 + Y_2}\right)} I_4 + I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_1 \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)}{Y_1 + \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)} & \frac{-Y_1 \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)}{Y_1 + \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)} \\ \frac{-Y_1 \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)}{Y_1 + \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)} & \frac{Y_1 \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)}{Y_1 + \left(\frac{Y_2 Y_4}{Y_2 + Y_4}\right)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_5 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

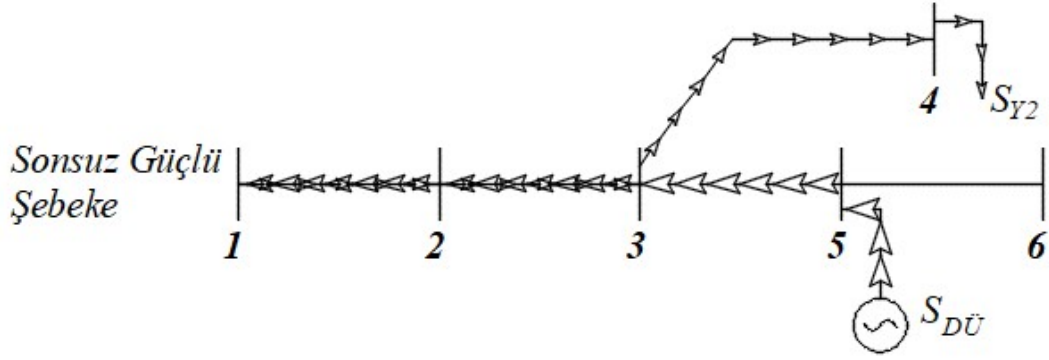
Sonsuz Güçlü  
Şebeke



Şekil 3.10 Örnek güç sisteminin 1 ve 5 baralarına indirgenmesi sonrasında elde edilen eşdeğer sistem

Denklem 3.44, örnek güç sisteminin iki baralı eşdeğerinin düğüm denklemlerini göstermektedir. Elde edilen denklemden anlaşılacağı üzere, kaldırılan baralardaki

yüklerin eşdeğerleri, kalan baralar üzerinde dağıtmıştır. Elde edilen yeni bara akımları kesme işareti (') indisi ile belirtilmiştir, ( $I'_1$  ve  $I'_5$ ). Bu akımlara ait matematiksel ifadeler incelendiğinde, her yüke ait akımın önündeki çarpanın, indirgendiği noktanın kısa devre gücü ve indirgendiği nokta ile ait olduğu nokta arasındaki ortak bağlantı noktasının kısa devre gücü oranı olduğu anlaşılmaktadır. Sistem içerisinde iki farklı noktanın, şebeke tarafında, birbirleriyle buluştukları noktayı ortak bağlantı noktası olarak aldığımızda, 2, 4 ve 6 numaralı baraların, 5 numaralı bara ile ortak bağlantı yaptıkları noktalar sırasıyla, Bara – 2, Bara – 3 ve Bara – 5'tir. Bu bilgilerin ışığında, Denklem 3.44'te elde edilen 5 numaralı bara akımı ifadesi içerisindeki yük akımlarının önündeki çarpanlar, sistem noktalarına ait kısa devre güçleri ile (3.45)'teki gibi ifade edilebilir.



Şekil 3.11 Bara – 5' teki dağıtık üretici ile Bara – 4'teki yükün Bara - 3 üzerinde yapmış oldukları ortak bağlantı

$$I'_5 = I_5 + \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBN2}} I_2 + \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBN4}} I_4 + \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBN6}} I_6 \quad (3.45)$$

Elde edilen denklem düzenlendiğinde (3.46) elde edilir.

$$I'_5 = I_5 + \sum_1^n \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} I_{Yük_n} \quad (3.46)$$

Burada  $S''_{DÜ}$  DÜ bağlantı noktasının kısa devre gücüdür.  $S''_{OBNn}$ ,  $n$ 'inci yükün bağlı olduğu bara ile DÜ bağlantı barasının ortak bağlantı noktasına ait kısa devre gücünü ifade eder.  $I_{Yn}$  ise,  $n$ 'inci yükün bağlı olduğundan çekilen akımı göstermektedir.

İndirgeme sonrasında elde edilen eşdeğer devrenin çözümü neticesinde elde edilen bara gerilimlerinin, özgün sistemin çözümünde elde edilen gerilimler ile aynı olması gerekmektedir. Eşitlik (3.46), sistemdeki yüklerin tamamının bağlı oldukları baralardan kaldırılarak, 1 ve 5 numaralı baraların özgün sistem çözümündeki gerilimlerini değiştirmeyecek büyüklükteki eşdeğerleri ile 1 ve 5 numaralı baralara dağıtılmaları sonucunda, 5 numaralı barada oluşturacakları akımın ifadesidir.

Yüklü durumun incelenmesi sonrasında elde edilen bulgular dikkate alındığında, eşdeğer sistem üzerinden, 5'inci baraya indirgenen herhangi bir yükün bağlı olduğu noktanın gerilimi hakkında bilgi sahibi olabilmek mümkün değildir. Ancak şu bilinmektedir ki, yükün bağlı olduğu baranın gerilimi, daima yükü besleyen noktanın gerilimine genlik olarak eşittir ya da o noktanın geriliminden daha düşüktür. Örnek sistemin yüklü ve üreticisiz durumu düşünüldüğünde yük baralarındaki gerilimler, 1.0 pu genlikteki sonsuz güçlü sistem barası geriliminden düşüktür. DÜ bağlantı öncesinde sorunsuz çalışmakta olan bir güç sisteminin, DÜ bağlantı sonrasında düşük gerilim sorunları yaşamaması beklenmez.

Sistemdeki üreticiler, bağlı oldukları nokta ve etrafında gerilimi yükseltirler, bu sebeple yüklerden farklı bir dikkat ile incelenmelidir. Çünkü sistemde bulunanlardan başka bir DÜ birimin sisteme eklenmesi, sistemde aşırı gerilim olasılığını artırır. Bu nedenle, sistemdeki üreticiler hesaplamalara katılırken, bizzat üreticilerin bağlantı noktalarının dikkate alınması gerekir. Eğer yüklerdeki gibi ortak bağlantı noktası üzerinden oluşturulacak bir orantı ile üreticinin eşdeğeri hesaplanacak olursa, yine yüklerde olduğu gibi ortak bağlantı noktası ötesinde bulunan üreticinin gerçekte bağlı olduğu noktanın gerilimi dikkate alınmamış olur. Bu şekilde yapılacak hesaplamalarda, ortak bağlantı noktası üst gerilim sınırının altında tutulmaya çalışılırken, üreticinin bağlı olduğu noktada gerilim sınır değeri aşılmış olabilir. Bu belirsizliğin önüne geçebilmek amacıyla, üreticilerin DÜ bağlantı noktasına indirgenmesi aşamasında, üreticinin bağlantı noktası dikkate alınır. Bu şekilde üretici için elde edilen eşdeğer üretimin sisteme sağlayacağı akım değeri, bağlantı noktası akımı değerinden ( $I_5$ ) eksiltir.

Sistemin yüklü ve üreticili durumunu yüksüz çalışma koşullarına benzetebilmek amacıyla yapılan indirgemeler sonrasında bağlantı barası akımı için türetilen yeni ifade (3.47)'deki gibidir.

$$I'_5 = I_5 + \sum_1^n \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} I_{Yük_n} - \sum_1^k \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜk}} \cdot I_{DÜk} \quad (3.47)$$

Burada  $S''_{DÜk}$ ,  $k$ 'ninci DÜ birimin bağlı olduğu baranın kısa devre gücüdür.  $I_{DÜk}$ ,  $k$ 'ninci DÜ birimin bağlı olduğu barada sisteme enjekte edilen akımı ifade eder.  $I_5$ , örnek güç sisteminin yüksüz durumu için Bara – 5'e bağlanabilecek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinde bir DÜ birimi bağlanması sonrasında, Bara – 5'ten sisteme enjekte edilecek akıma karşılık gelir. Dolayısıyla, sistemdeki yükler, DÜ biriminin sisteme sağlamış olduğu akım ile besleneceklerdir ve bu nedenle bu yüklerin DÜ bağlantı noktasındaki eşdeğerleri kadar daha kapasite artırımı yapılabilecektir. Ancak üreticilerde ise durum daha farklıdır. Yüksüz durum için hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi, sistemde var olan üreticilerin, Bara – 5 üzerindeki eşdeğerleri miktarınca azaltılmalıdır.

Eşitlik (3.47)'de verilen matematiksel ifade akımlar üzerinden tanımlıdır, ancak genelde bu tür problemlerin çözümünde güç değerlerinin kullanılması daha uygundur. Eşitlik (3.47)'deki akımlar, ait oldukları bileşenlerin güç ve gerilim değerleri üzerinden (3.48)'deki gibi ifade edilebilir.

$$\left(\frac{S'_{DÜ}}{V'_{DÜ}}\right)^* = \left(\frac{S_{DÜ}}{V_{DÜ}}\right)^* + \sum_1^n \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} \left(\frac{S_{Yük_n}}{V_{Yük_n}}\right)^* - \sum_1^k \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜk}} \cdot \left(\frac{S_{DÜk}}{V_{DÜk}}\right)^* \quad (3.48)$$

Burada,  $S_{DÜ}$ , güç sisteminin yüksüz durumu için hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesidir. Bu değer, önceki kısımlarda yüksüz durum için mevcut ve önerilen matematiksel modellerden birisi ile hesaplanabilmektedir.  $S'_{DÜ}$ , ise sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumuna karşılık gelen yüklenmelerin ve üretimlerin hesaplamalara katılması ile elde edilen maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesine karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, bu kapasiteye ait ifadenin elde

edilebilmesi için, denklemin her iki tarafı da  $V'_{DÜ}^*$  ile çarpıldığında, eşitlik (3.49) elde edilir.

$$S'_{DÜ}{}^* = \left(\frac{V'_{DÜ}}{V_{DÜ}}\right)^* \cdot S_{DÜ}^* + \sum_1^n \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} \left(\frac{V'_{DÜ}}{V_{Yük_n}}\right)^* S_{Yük_n}^* - \sum_1^k \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜk}} \cdot \left(\frac{V'_{DÜ}}{V_{DÜk}}\right)^* S_{DÜk}^* \quad (3.49)$$

Sistemin yüksüz durumu için önerilen matematiksel modellerde, bağlantı noktası gerilimi sistem üst gerilim sınırına eşit olarak alınır. Ancak bu şekilde maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi elde edilebilir. Eşitlik (3.48)'de,  $V'_{DÜ}$  gerilimi, sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumu dikkate alınarak belirlenen maksimum izin verilebilir bağlantı kapasitesinde bir DÜ birimin sisteme bağlanması sonrasında, bağlantı noktası üzerinde elde edilecek gerilim değeridir. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin doğru hesaplanması durumunda, bağlantı noktasında elde edilecek gerilim, yine üst gerilim sınırına eşit olmalıdır. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda  $|V'_{DÜ}| = |V_{DÜ}|$  olarak alınır. Denklem 3.49'in sağ tarafındaki ilk elemanda, bu iki gerilimin fazörel eşleniklerinin oranı bulunmaktadır. Genlikleri eşit olan bu fazörlerin, faz açıları arasındaki fark ihmal edilerek bu ifade basitleştirilebilir.

Eşitlik (3.49)'un sağ tarafındaki ikinci ifade içerisinde, DÜ bağlantı noktası gerilimi ile sistemdeki yüklere ait gerilimlerin oranı yer almaktadır. Doğru hesaplanan bir kapasite ile sisteme bağlanan DÜ birimin, bağlantı noktasında üst gerilim sınırındaki gerilim değerini oluşturması beklenir ve bu noktanın geriliminin sistemdeki en yüksek gerilim değeri olması öngörülür. Sistemin, DÜ bağlantı öncesinde sorunsuz çalışmakta olduğu bilinmektedir ve çalışmanın temelinde esas kısıt olarak sistem üst gerilim sınırı alındığından dolayı, hesaplanan kapasitede bir DÜ birimin sisteme bağlantısı sonrasında sistemde aşırı gerilimlerin oluşmayacağı garanti edilebilir. Dolayısıyla, sistemdeki bara gerilimleri, sistem alt ve üst gerilim sınırları arasında olacaktır.

Tez kapsamında, ikinci bölümde verilen mevzuatların detayları dikkate alındığında, üst gerilim sınırı olarak 1.1 pu, alt gerilim sınırı olarak ise 0.9 pu değerleri esas alınabilir. Eşitlik (3.49)'daki ikinci terim, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesine pozitif yönde katkı sağlamaktadır. Sistem gerilimleri için esas alınan üst ve alt sınırlar, bir önceki paragrafta açıklanan yaklaşıma uygun bir şekilde değerlendirildiğinde, bağlantı noktası



gerilimi ile yük noktası gerilimleri oranının 1 ile 1.22 değerleri arasında olması beklenir. Bu sınır değerleri arasından belirlenecek değer, yüklerin, DÜ bağlantı noktasındaki eşdeğerini belirleyecektir ve bu değer sistemin yüksüz çalışma koşullarına göre hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesine eklenecektir. Aşırı gerilim sorunlarına neden olmayacak şekilde, en güvenli kapasite değerinin belirlenebilmesi amacıyla, temkinli bir yaklaşım ile bu gerilimlerin oranı 1 olarak alınabilir.

Bunun yanısıra, (3.49)'da, eşitliğin sağ tarafındaki son ifade, sistemdeki üreticilerin maksimum izin verilebilir kapasite üzerindeki katkılarını ifade eder. Sistemdeki üreticilerin bu kapasiteye katkıları, bu kapasiteyi azaltıcı yöndedir. Üreticilerin bağlı oldukları noktalar genelde yüksek gerilimlere sahiptirler. Ancak, alabilecekleri maksimum gerilim değeri 1.1 pu olarak esas alınan sistem üst gerilim sınırındadır. Aynı şekilde, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantısı kapasitesinde bir DÜ bağlantısının, bağlantı noktasındaki gerilimi 1.1 pu değerine getireceği esas alınmıştır. Dolayısıyla, (3.49)'un üçüncü kısmında yer alan bağlantı noktası gerilimi ile üreticilerin bağlı oldukları noktaların gerilimlerinin oranı için 1 değerini seçmek doğru bir yaklaşım olacaktır.

Yukarıdaki yaklaşımlar benimsenerek, eşitlik (3.49) tekrar düzenlendiğinde, sistemin yüklü ve üreticili durumu için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesine ait görünür güç ifadesi (3.50)'deki gibi elde edilebilir. Aynı kapasite için aktif ve reaktif güç ifadeleri ise sırasıyla, (3.51) ve (3.52)'de verildiği gibidir.

$$S'_{DÜ} = S_{DÜ} + \sum_1^n \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} \right)^* S_{Yük_n} - \sum_1^k \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜ_k}} \right)^* S_{DÜ_k} \quad (3.50)$$

$$P'_{DÜ} = P_{DÜ} + |S''_{DÜ}| \left\{ \sum_1^n \frac{|S_{Yük_n}|}{|S''_{OBNn}|} \cdot \cos(\theta_{OBNn} - \theta_{DÜ} + \varphi_{Yük_n}) - \sum_1^k \frac{|S_{DÜ_k}|}{|S''_{DÜ_k}|} \cdot \cos(\theta_{DÜ_k} - \theta_{DÜ} + \varphi_{DÜ_k}) \right\} \quad (3.51)$$

$$Q'_{DÜ} = Q_{DÜ} + |S''_{DÜ}| \left\{ \sum_1^n \frac{|S_{Yük_n}|}{|S''_{OBN_n}|} \cdot \sin(\theta_{OBN_n} - \theta_{DÜ} + \varphi_{Yük_n}) - \sum_1^k \frac{|S_{DÜ_k}|}{|S''_{DÜ_k}|} \cdot \sin(\theta_{DÜ_k} - \theta_{DÜ} + \varphi_{DÜ_k}) \right\} \quad (3.52)$$

Bir güç sistemi içerisindeki yükler ve üreticiler dikkate alınarak, sistem içerisinde bir noktaya ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi, (3.50) ile önerilen matematiksel modeller yardımıyla gerçekleştirilebilir.

### DURUM ANALİZLERİ

Bir önceki bölümde, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabı için önerilen matematiksel modeller detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu matematiksel modellerin tamamı sistemin yüksüz durumunu esas alarak ve çeşitli ihmallere dayalı yaklaşımlar benimsenerek türetilmişlerdir. Bu tez çalışmasında mevcut matematiksel modelleri geliştirmek amacıyla, yine sistemin yüksüz durumunu esas alan, ancak diğer matematiksel modellerin ihmal ettikleri değişkenlerin söz konusu kapasite üzerinde etkisini dikkate alan yeni bir yaklaşım ile maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi tekrar incelenmiştir. Bu çalışmanın neticesinde, Denklem 3.34 ile verilen yeni bir matematiksel model ortaya konulmuştur.

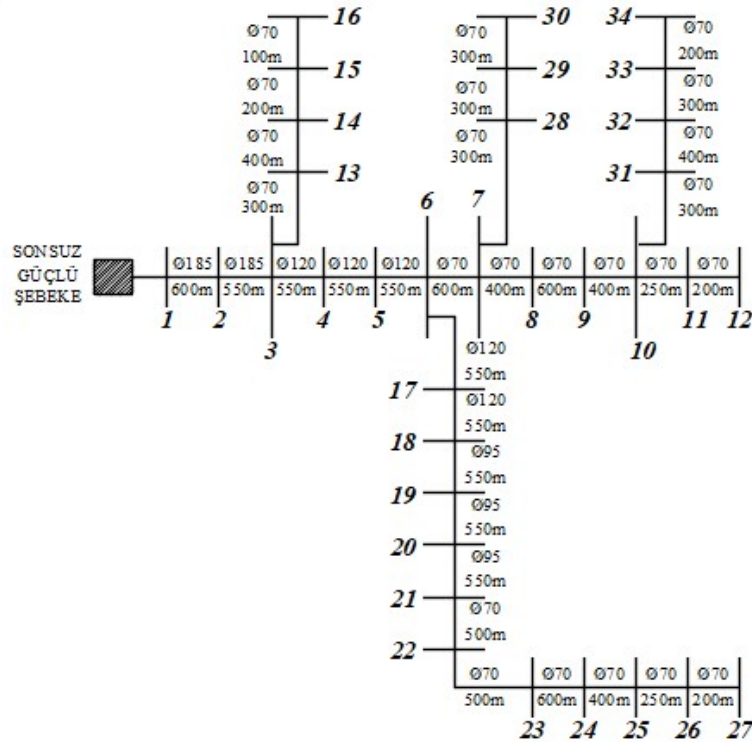
Sonrasında ise sistemdeki yükleri ve üreticileri dikkate alan yeni bir yaklaşım ile izin verilebilir maksimum DÜ bağlantı kapasitesi hesabına yönelik yeni bir ifadenin elde edilmesi amaçlanmıştır. Böyle bir ifadenin elde edilebilmesi amacıyla sistemin minimum yük – maksimum üretim durum senaryosunun esas alınması uygun görülmüş ve yapılan analizler neticesinde Denklem 3.50'deki matematiksel model önerilmiştir. Çalışma bünyesinde elde edilen iki matematiksel modelden ilki, alternatiflerine göre daha az ihmale dayanıyor olması sebebiyle, daha güvenilir ve daha doğru sonuçlar verebilecektir. Önerilen diğer matematiksel model ise, uygun bir yaklaşım üzerinden sistemdeki yükleri ve üreticileri hesaplamalara katabiliyor olması sebebiyle, literatürde tek olma özelliğini taşımaktadır. Bu matematiksel modelin maksimum izin verilebilir DÜ bağlantısı hesaplamalarında kullanılması ile daha güvenilir ve gerçeğe yakın maksimum bağlantı

kapasitesi elde edilebilecektir. Bunun yanı sıra, bu matematiksel modelin, güç sistemleri açısından uygulanabilirliği diğerlerine göre daha yüksektir.

Önerilen matematiksel modellerin test edilmesi ve alternatiflerine göre üstünlüklerinin kanıtlanması amacıyla, bir test sistemi üzerinden farklı durumların analizleri gerçekleştirilecek ve farklı matematiksel modellerden elde edilen bağlantı kapasitelerinin, test sistemi üzerindeki etkilerinin karşılaştırılması suretiyle, matematiksel modellerin tutarlılıkları incelenecektir.

#### 4.1 Test Sistemi

Bu bölümde gerçekleştirilecek durum analizlerinin tamamında 34 Baralı radyal test sistemi kullanılacaktır [67]. Test sisteminin nominal gerilimi 11 kV seviyesindedir ve üç fazlı dengeli bir güç sistemidir. Sistemin tamamı havai iletken hatlardan oluşmaktadır. Test sistemine ait tek hat diyagramı, hat uzunlukları ve kesitleri ile birlikte Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 34 Baralı Radyal Güç Sistemi

Bu bölümde, sistemin yüksüz durumu ve sistemde yüklerin ve üreticilerin bulunduğu durum için iki ayrı analiz gerçekleştirilecektir. Sistemde 1 numaralı bara, sonsuz güçlü şebeke bağlantı noktası olarak belirtilmiştir ve her iki durum analizinde de  $1.0 \angle 0$  pu referans gerilimde alınacaktır. Sistem ait güç bazı ise 1 MVA değerinde seçilmiştir.

#### 4.2 Sistemin Yüksüz Durumu Esas Alınarak Gerçekleştirilen Analizler

Bu bölümde, sistemin yüksüz durum senaryosu esas alınarak, sistem içerisinde seçilen noktalar için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi mevcut matematiksel modeller (Denklem 3.15, 3.22 ve 3.23) ve tez çalışmasında önerilen matematiksel model (Denklem 3.34) kullanılarak hesaplanmıştır. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi, DÜ bağlantısı sonrasında bağlantı noktası gerilimini, sistem üst gerilim sınır değerine getirebilecek yeterlilikte olmalıdır. Bu nedenle yapılan hesaplamalarda, DÜ bağlantı noktası gerilimi, sistem üst gerilim sınırı değeri olarak alınan 1.1 pu genlikte kabul edilmiştir. Bağlantı noktası açısından iki farklı senaryonun oluşturulabilmesi amacıyla, Bara – 5 ve Bara – 27 noktaları DÜ bağlantı noktaları olarak belirlenmiştir. Bara – 27, sistem içerisinde en düşük kısa devre gücüne sahip baradır. Diğer bir deyişle, test sistemindeki en zayıf bağlantı noktasıdır. Bara – 5 ise, Bara – 27'ye göre sonsuz güçlü şebekeye daha yakın ve dolayısıyla daha yüksek kısa devre gücüne sahip bir noktadır. Bu iki farklı karakterde bağlantı noktalarının seçimi ile matematiksel modellerin, bağlantı noktası karakteristik değerlerine göre tutarlılıkları hakkında fikir sahibi olabilmek amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra, sisteme dâhil edilecek DÜ biriminin güç faktörü için farklı değerler seçilerek, DÜ birimin güç faktöründeki değişim ile matematiksel modeller ile elde edilecek değerler arasındaki etkileşimin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, 0.9 ileri ve 0.9 geri güç faktörü değerleri ile tanımlı bir aralık belirlenmiştir.

Oluşturulan senaryoların incelenmesi aşamasında aşağıdaki akış takip edilecektir.

- **1. ADIM:** İncelenecek durum senaryosunu tanımlayan DÜ bağlantısı noktası ve DÜ birimin güç faktörü değeri için izin verilebilir maksimum bağlantı kapasitesi, her bir matematiksel model (Denklem 3.15, 3.22, 3.23 ve 3.34) kullanılarak hesaplanır.

- 2. ADIM: En yüksek kapasiteyi hesaplayabilen matematiksel modelin tespiti amacıyla hesaplamalar sonucu elde edilen kapasiteler karşılaştırılır,

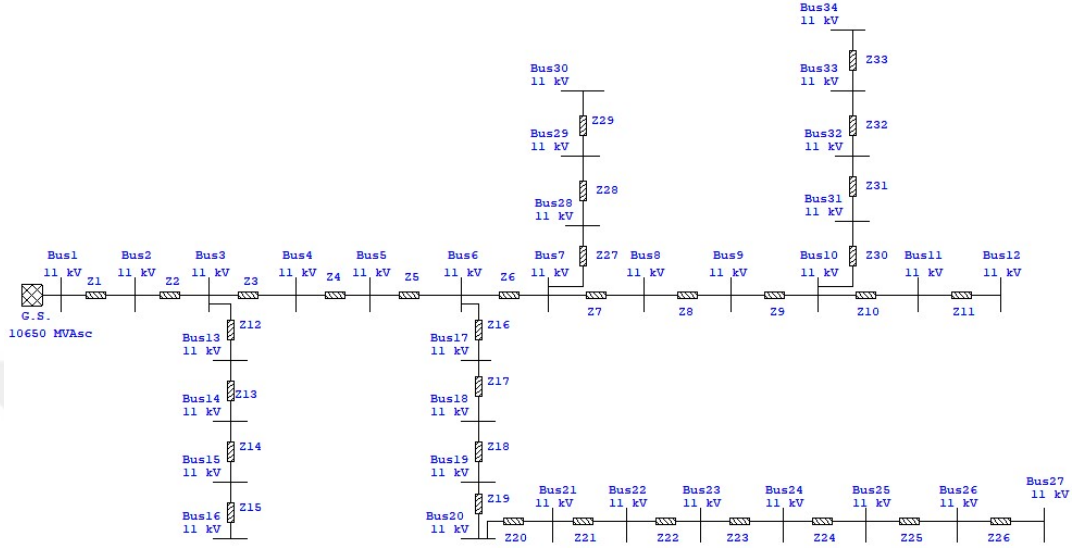
Matematiksel modellerden elde edilen değerlerin tutarlılıklarını test etmek amacıyla, her bir değer için aşağıdaki adımlar takip edilerek incelenir.

- 3. ADIM: Elde edilen kapasitede bir DÜ birimi, hesaplamalarda esas alınan bağlantı noktasından sisteme dâhil edilir,
- 4. ADIM: DÜ katılım sonrasında sistemin güç akış analizi çalışılır,
- 5. ADIM: Güç akış analizi sonuçlarında, bağlantı noktası ve diğer sistem gerilimleri incelenerek, sistem gerilimlerinin izin verilen aralıkta olup olmadıklarının kontrolü yapılır (Aşırı gerilim denetlemesi).
- 6. ADIM: İlgili matematiksel model kullanılarak hesaplanan değerde bir DÜ birimin sisteme bağlantısı sonrasında, bağlantı noktası gerilimi, hesaplamalarda esas alındığı gibi üst gerilim sınır değerine eşit olmalıdır. Bu değere eşitlik veya yakınlık kıyaslaması ile matematiksel modelin tutarlılıkları incelenir.

Birinci ve ikinci adımlar, herhangi bir yazılıma ihtiyaç duyulmaksızın, sadece matematiksel işlemler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Üçüncü adımda, güç sistemi modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada, bu adım, ETAP programı üzerinden oluşturulan güç sistemi modeli üzerinden gerçekleştirilmiştir, (Şekil 4.2). ETAP (Electrical Transient and Analysis Program), güç sistemi modellemesi ve analizi için kullanılan bir yazılım paketidir [68]. Güç sistemlerinde birçok analizin gerçekleştirilebilmesi, geniş bir kütüphaneye sahip olması ve görsel anlamda başarılı bir ara yüz sunması açısından oldukça başarılı bir yazılımdır [69].

Bara – 27 ve Bara -5 için yapılan hesaplamalar ve güç analizleri neticesinde elde edilen sonuçlar, sırasıyla Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2 'de verilmiştir. Dağıtık üretici için 5 farklı güç faktörü değeri belirlenerek, her bir değer için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi,  $S_{DÜ}$ , hesaplaması yapılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, dağıtık üretici gerilimi,  $V_{DÜ}$  tüm hesaplamalarda sistem üst gerilim değeri olan 1.1 pu değerinde alınmıştır. Üst indis ile gösterilen dağıtık üretici gerilimi,  $V'_{DÜ}$ , hesaplanan kapasitede bir

DÜ birimin güç sistemine katılımı ardından, güç sisteminin güç akış analizleri neticesinde elde edilen bağlantı noktası gerilimini ifade etmektedir.



Şekil 4.2 Test sisteminin ETAP modeli

Çizelge 4-1 Bara – 27 için yapılan hesaplamalar ve analizler sonrasında elde edilen sonuçlar

Hesaplamalarda dikkate alınan dağıtık üretici güç faktörü		Hesaplanan Kapasite Değeri ( $V_{DÜ} = 1.1 pu$ için) ve Bu kapasitede DÜ katılım sonrası bağlantı noktası gerilimi			
		Denklemler 3.34	Denklemler 3.23	Denklemler 3.22	Denklemler 3.15
0.9 (geri)	$S_{DÜ}$	4.540 MVA	4.529 MVA	4.117 MVA	-
	$V'_{DÜ}$	1.1 pu	1.0998 pu	1.0914 pu	-
0.95 (geri)	$S_{DÜ}$	4.438 MVA	4.437 MVA	4.033 MVA	-
	$V'_{DÜ}$	1.1 pu	1.1 pu	1.0916 pu	-
1.00 (birim güç faktörü)	$S_{DÜ}$	4.553 MVA	4.541 MVA	4.128 MVA	4.3025 MVA
	$V_{DÜ}$	1.1 pu	1.0997 pu	1.0914 pu	1.0949 pu
0.95 (ileri)	$S_{DÜ}$	5.281 MVA	5.180 MVA	4.709 MVA	-
	$V'_{DÜ}$	1.1 pu	1.0983 pu	1.0944 pu	-
0,90 (ileri)	$S_{DÜ}$	5.896 MVA	5.694 MVA	5.176 MVA	-
	$V'_{DÜ}$	1.1 pu	1.0970 pu	1.0890 pu	-

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde görülmektedir ki, önerilen matematiksel modelin diğer matematiksel modellerden elde edilen değerlere göre daha yüksek

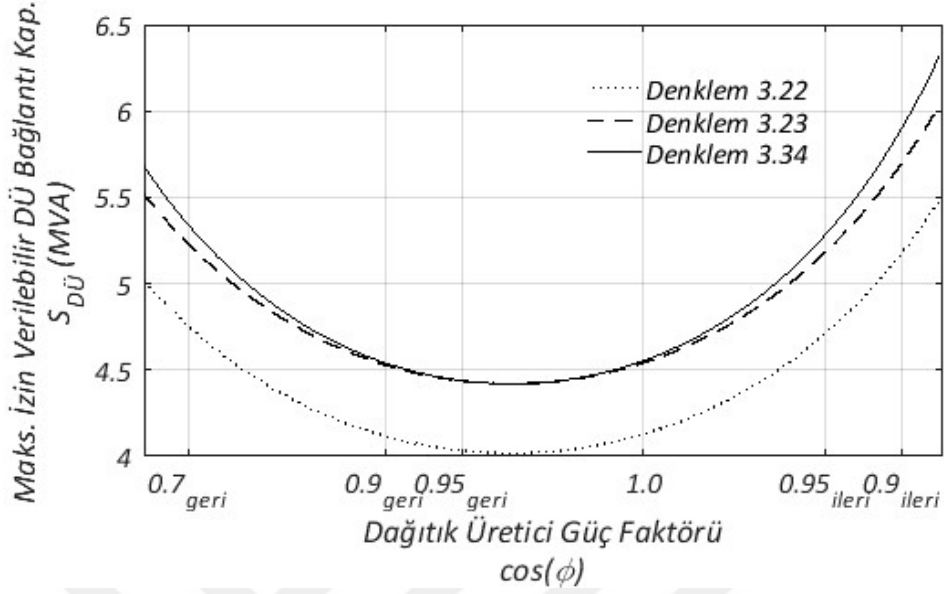
bağlantı kapasitesi değerini verdiği görülmüştür. Önerilen matematiksel model ile elde edilen değerlere en yakın sonuçlar Denklem 3.23 ile yapılan hesaplamalarda elde edilmiştir. Denklem 3.22, DÜ bağlantı sonrasında sistemde oluşacak güç kayıplarını ihmal ediyor olması sebebiyle, Denklem 3.23'ten daha düşük kapasitede sonuçlar vermiştir. Denklem 3.15, dağıtık üreticinin güç faktörü değerini dikkate almadığından dolayı sadece birim güç faktörü ile katılım koşullarında kullanılabilir ve bu koşullar dışında değer verememektedir. Elde edilen kapasitelerin tutarlılıkları incelendiğinde, hesaplamalarda bağlantı noktası gerilimi için esas alınan gerilim değeri, 1.1 pu, sadece önerilen matematiksel model ile hesaplanan kapasiteler ile sağlanabilmiştir. Dolayısıyla, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabında kullanılacak matematiksel modeller arasından en doğru sonuçlar önerilen matematiksel model ile elde edilmiştir.

Çizelgede verilen sonuçlar, dağıtık üreticinin değişen güç faktörlerine göre incelendiğinde, ileri güç faktörü ile dağıtık üreticinin güç sistemlerine daha yüksek kapasitelerde katılabildiği görülmektedir. Bunun nedeni, dağıtık üreticinin sağladığı aktif ve reaktif güç akışlarının birbirine ters yönde seyretmesi olarak yorumlanabilmektedir.

Önerilen matematiksel model ile elde edilen değerlere en yakın değerleri veren Denklem 3.23'teki matematiksel model, DÜ bağlantı sonrasında sistemde oluşan gerilim sapmasının enine bileşenini ihmal ediyor olması sebebiyle, daha düşük sonuçlar vermektedir. Çizelge 4.1'deki değerlerden, dağıtık üreticinin güç faktörü, birim güç faktörü değerinden uzaklaştıkça bu farkın arttığı gözlemlenebilmektedir. Matematiksel modeller ile hesaplanan kapasite değerlerinin, değişen güç faktörüne göre davranışları Şekil 4.3'te verilmiştir.

Bara – 5 için yapılan analizlerin sonucu Çizelge 4.2'de verilmiştir. 5 numaralı baradan sisteme dâhil edilecek maksimum izin verilebilir DÜ kapasite, 27 numaralı bara için elde edilen değerlerden daha yüksektir. Bara – 5'in, Bara – 27'ye göre sonsuz güçlü şebeke bağlantı barasına (Bara – 1) daha yakın olması sebebiyle, daha güçlü bir bağlantı noktasıdır ve yüksek kısa devre gücüne sahiptir. Çalışmada incelenen matematiksel modellere bakılacak olursa, bağlantı noktası kısa devre gücü, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabında bir çarpan olarak yer almaktadır.





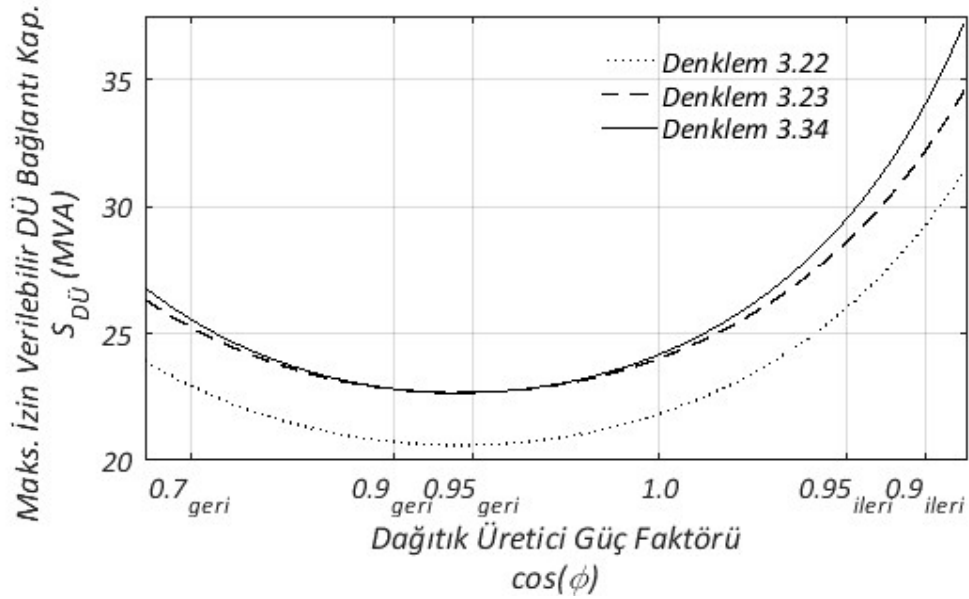
Şekil 4.3 Bara – 27 için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin, dağıtık üretici güç faktörüne göre değişimi

Her bir matematiksel modelden elde edilen kapasiteler karşılaştırıldığında, en yüksek kapasite değeri, bir önceki durum incelemesinde olduğu gibi önerilen matematiksel modele aittir. Hesaplanan her bir kapasitesinin tutarlılığını incelemek üzere gerekli adımlar takip edilerek yapılan incelemeler neticesinde, en tutarlı sonuçların yine önerilen matematiksel model yardımı ile bulunabildiği görülmüştür. Önerilen matematiksel model ile her durum senaryosu için bağlantı noktası gerilimi daima 1.1 pu olarak elde edilmiştir.

Görüldüğü üzere, Bara – 5 için elde edilen sonuçlar, Bara – 27 için elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermektedir. Bara – 5 için, maksimum izin verilebilir kapasitesinin, dağıtık üretici güç faktörü değişimi karşısındaki davranışı Şekil 4.4'te verilmiştir. Verilen şekil incelendiğinde, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin güç faktörü karşısındaki davranışı, Bara – 27'nin incelemelerinde elde edilen sonuç ile benzer karakterdedir.

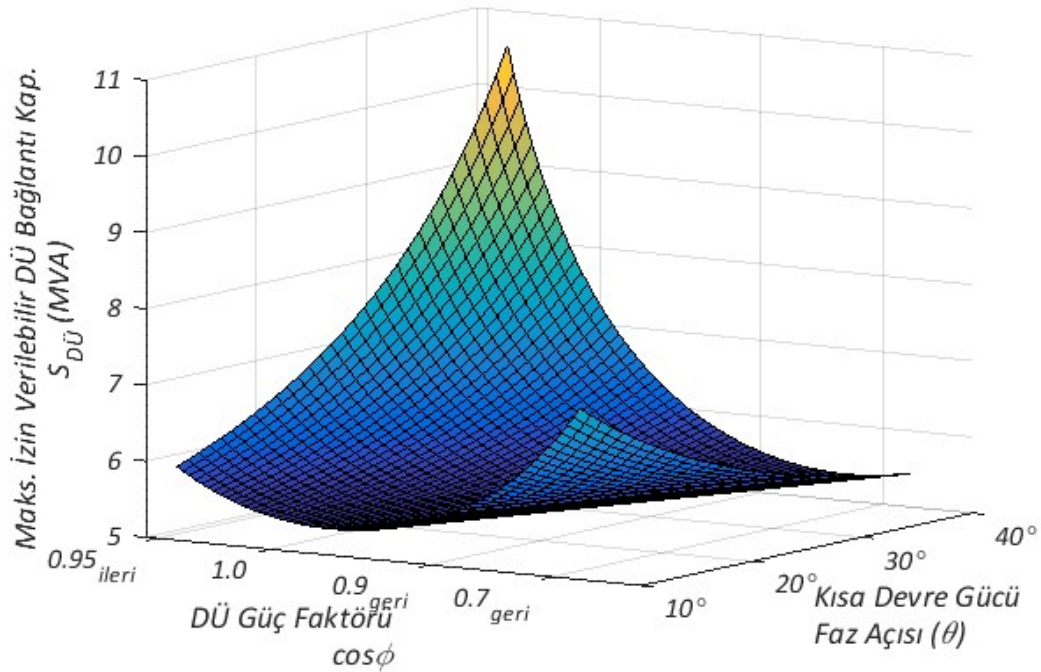
Çizelge 4-2 Bara – 5 için yapılan hesaplamalar ve analizler sonrasında elde edilen sonuçlar

Hesaplamalarda dikkate alınan dağıtık üretici güç faktörü		Hesaplanan Kapasite Değeri ( $V_{DÜ} = 1.1 pu$ için) ve Bu kapasitede DÜ katılım sonrası bağlantı noktası gerilimi			
		Denklem 3.34	Denklem 3.23	Denklem 3.22	Denklem 3.15
0.9 (geri)	$S_{DÜ}$	22.856 MVA	20.842 MVA	20.765 MVA	N/A
	$v'_{DÜ}$	1.1 pu	1.0999 pu	1.0916 pu	N/A
0.95 (geri)	$S_{DÜ}$	22.703 MVA	22.702 MVA	20.638 MVA	N/A
	$v'_{DÜ}$	1.1 pu	1.1 pu	1.0916 pu	N/A
1 (birim güç faktörü)	$S_{DÜ}$	24.213 MVA	24.062 MVA	21.875 MVA	21.410 MVA
	$v_{DÜ}$	1.1 pu	1.0994 pu	1.0911 pu	1.0893 pu
0.95 (ileri)	$S_{DÜ}$	29.546 MVA	28.642 MVA	26.038 MVA	N/A
	$v'_{DÜ}$	1.1 pu	1.0973 pu	1.0893 pu	N/A
0,90 (ileri)	$S_{DÜ}$	34.063 MVA	32.228 MVA	29.299 MVA	N/A
	$v'_{DÜ}$	1.1 pu	1.0953 pu	1.0876 pu	N/A

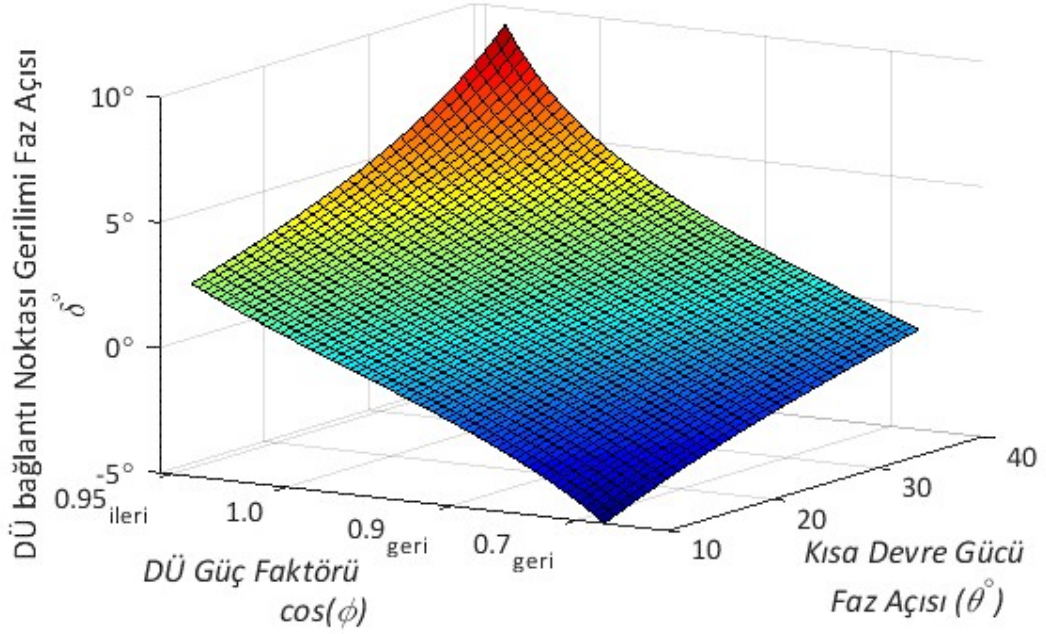


Şekil 4.4 Bara – 5 için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin, dağıtık üretici güç faktörüne göre değişimi

DÜ bağlantı sonrasında sistemde oluşan gerilim sapsmasının enine bileşeninin ihmal edilmesi, aslında DÜ bağlantı noktası geriliminin faz açısının ihmal edilmesine karşılık gelmektedir. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi ile bu faz açısı arasındaki ilişkiye geri dönecek olursak, aşağıda Bara – 27 için önerilen matematiksel model kullanılarak maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi ve DÜ bağlantı noktası gerilimi faz açısı için iki farklı çizim verilmiştir. Şekil 4.5'te, belirli aralıklardaki kısa devre gücü faz açısı ve DÜ güç faktörü değişimleri için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin değişimi verilmiştir. Şekil 4.6'da ise, yine aynı aralıklardaki kısa devre gücü faz açısı ve DÜ güç faktörü değişimleri için DÜ bağlantı noktası geriliminin faz açısının değişimi verilmiştir. İki çizim karşılaştırıldığında görülmektedir ki, DÜ bağlantı noktası geriliminin faz açısı sıfırdan uzaklaştıkça, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin arttığı görülmektedir. Buna göre, DÜ bağlantı noktası gerilimi faz açısı veya DÜ bağlantı sonrasında oluşan gerilim sapsmasının enine bileşeninin ihmalinin yapıldığı hesaplamalarda, gerçek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinden eksik değerde sonuçları elde edilmektedir.



Şekil 4.5 Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin kısa devre gücü faz açısı ve DÜ güç faktörü değişimleri karşısındaki davranışı



Şekil 4.6 DÜ bağlantı noktası gerilimi faz açısının kısa devre gücü faz açısı ve DÜ güç faktörü değişimleri karşısındaki davranışı

#### 4.3 Sistemin Yüklü ve Üreticili Durumunun Analizi

Durum analizleri çalışmasının ikinci kısmında, sisteme bağlı yükler ve üreticiler dikkate alınarak maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin hesaplanması amaçlanmıştır. Sistemin yüklü ve üreticili durumu için uygun bir durum senaryosu oluşturabilmek amacıyla, sistemin belirli noktalarına çeşitli yükler ve üreticiler bağlanmıştır. Bu yüklerin belirlenmesinde, sistemde minimum tüketimi gerçekleştiren ve sürekli sistem içerisinde faaliyette bulunan taban yükler esas alınmıştır. Sistemdeki üreticiler ise, sistemde maksimum üretimi gerçekleştirebilecek ve daha ötesinde üretimin gerçekleşebilmesine imkân bırakmayacak şekilde, kurulu güçleri ile dikkate alınmıştır. Sisteme ait minimum tüketim maksimum üretim durum senaryosu, Çizelge 4.3'te verilen yükler ve üreticiler dikkate alınarak elde edilmiştir.

Bu aşamada, tez çalışması kapsamında önerilen Denklem 3.50 kullanılacaktır. Üçüncü bölümde detaylı bir şekilde anlatıldığı üzere, Denklem 3.50, iki ana kısımdan oluşmaktadır. Bunlardan birisi, sistemin yüksüz durumu için söz konusu bağlantı noktasına ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesini hesaplayan kısım, diğeri ise sistemdeki yüklerin ve üreticilerin uygun bir yaklaşım ile elde edilen bağlantı noktası

üzerindeki etkilerini hesaplayan kısımdır. Denklem birinci kısmında gerekli kapasitenin elde edilebilmesi için, tez çalışmasında önerilen matematiksel model ile birlikte, 4 farklı alternatif bulunmaktadır. Yapılacak çalışmanın hassasiyetine uygun olarak bunlardan birisi seçilebilir. En doğru değerin hesaplanabilmesi için, yukarıda yapılan durum analizleri ile kanıtlandığı üzere, önerilen matematiksel model kullanılması daha uygun olacaktır.

Çizelge 4-3 Minimum tüketim, maksimum üretim durum senaryosunu oluşturan yükler ve üreticiler

Yükler ve Üreticiler	Kapasite (MVA)	Güç Faktörleri	Bağlı Olunan Bara
Yük – 1	0.5	0.95 (geri)	Bara – 5
Yük – 2	0.5	0.90 (geri)	Bara – 12
Yük – 3	0.4	0.98 (geri)	Bara – 27
Yük – 4	0.6	0.97 (geri)	Bara – 30
DÜ – 1	1.0	0.90 (geri)	Bara – 22
DÜ – 2	3.0	0.90 (geri)	Bara – 34

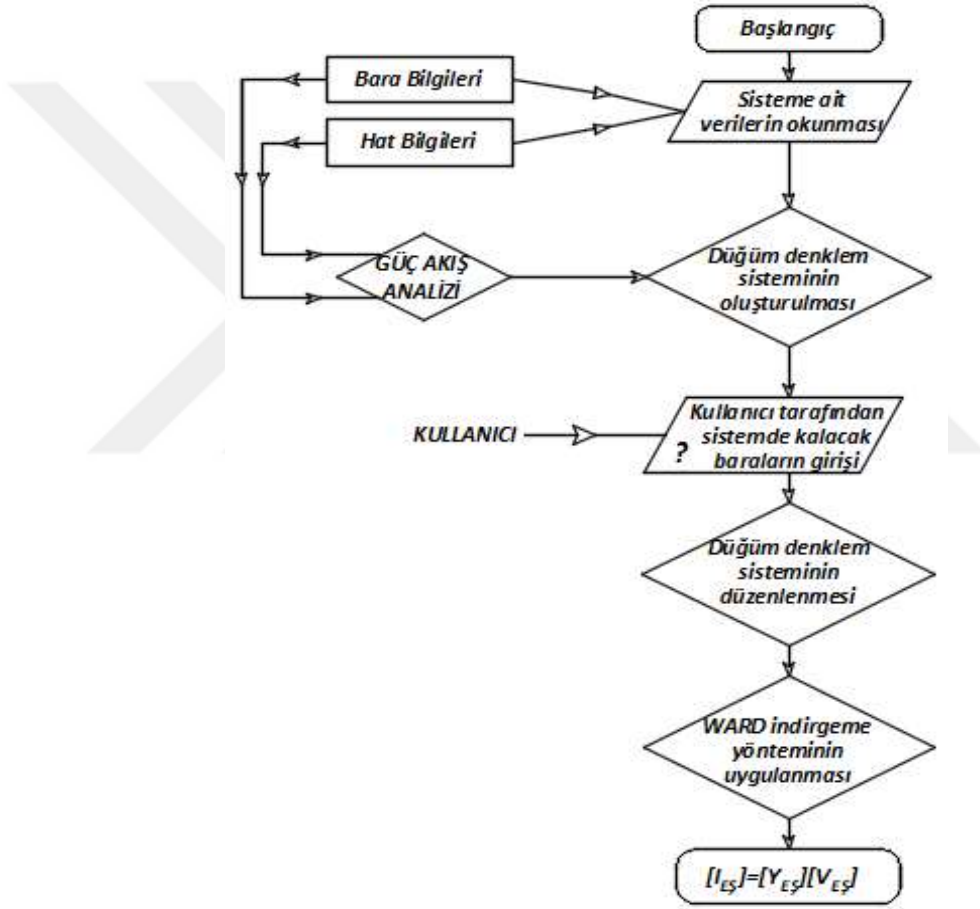
Denklem ikinci kısmında, sistemdeki yüklerin ve üreticilerin bağlantı noktası üzerindeki etkilerinin matematiksel ifadesi, örnek bir sistem modeli üzerinde Ward ağ indirgeme yöntemi kullanılarak elde edilen bağıntıların yorumlanması ile türetilmiştir. Sistemin yüklü ve üreticili durumuna yönelik analizlere geçilmeden önce, gerilim tabanlı DÜ planlamalarda Ward ağ indirgeme yönteminin başarısını kanıtlamak üzere bir ön inceleme gerçekleştirilmiştir.

#### 4.3.1 DÜ Planlamalarda Ward Ağ İndirgeme Yönteminin Kullanımı

Ward ağ indirgeme yöntemi, sistemin bir çözümü üzerinden tanımlı düğüm denklemleri sisteminde, sistemden kaldırılması istenilen noktalara ait denklemlerin, gauss eleme yöntemi ile uygun bir şekilde düğüm denklem sisteminden çıkartılmaları esasına dayanır.

Bu bölümde, üzerinde çalışılan 34 baralı radyal test sisteminin, Çizelge 4.3 ile verilen yüklü ve üreticili durumu için, 1 ve 20 numaralı baralardan oluşan, 2 baralı eşdeğerinin elde edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk olarak sistemin yüklü ve üreticili durumunun çözümü, sonrasında bu çözüme göre düğüm denklem sisteminin oluşturulması ve en

nihayetinde, bu denklem sistemi üzerinde uygun işlemler takip edilerek sistemin indirgenmiş eşdeğerine ait düğüm denklemlerinin elde edilmesi aşamaları takip edilmiştir. Tüm hesaplamalar MATLAB ortamında geliştirilen bir algoritma yardımı ile gerçekleştirilmiştir. MATLAB ortamında oluşturulan algoritmanın akış şeması, Şekil 4.7 ile verilmiştir. Uygulama içerisinde bir işlem basamağı olarak, sistemin güç akış analizi, Newton Raphson güç akış yöntemi esas alınarak oluşturulan bir MATLAB uygulaması ile yerine getirilmiştir.



Şekil 4.7 Ward indirgeme yöntemi için takip edilen akış şeması

Yukarıda verilen akış takip edilerek, 34 Baralı güç sistemine uygulanan Ward indirgeme yöntemi neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibidir.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ 1.3231\angle -33.7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 79.81\angle -15.87 & 79.81\angle 164.13 \\ 79.81\angle 164.13 & 79.81\angle -15.87 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.0\angle 0 \\ V_{22} \end{bmatrix} \quad 4.1$$

Yapılan işlemler neticesinde, iki baraya indirgenmiş sistemin admitans matrisi Eşitlik 4.1 ile verildiği gibidir. Özgün sisteme ait bara bilgileri ve güç akış analizi sonrasında elde edilen gerilim değerleri üzerinden, salınım barası hariç, her bir baraya ait akım değeri bulunabilir. Sistemdeki yüklerin ve üreticilerin sabit akımlı oldukları varsayılarak, bu akım değerleri ile yürütülen indirgeme işlemleri sonrasında, indirgenmiş sistemdeki salınım barası dışındaki baraların eşdeğer akımları elde edilebilir. Elde edilen bu akımlar ve admitans matrisi üzerinden elde edilecek empedans değerleri kullanılarak, indirgenmiş sistemdeki baralara ait gerilimler, Denklem 4.2 ve Denklem 4.3’de gösterildiği şekilde hesaplanabilir.

$$1.3131\angle - 33.7 = 79.81\angle 164.13 + (79.81\angle - 15.87)V_{22} \quad (4.2)$$

$$V_{22} = 1.0158\angle - 16.41 \quad (4.3)$$

Yapılan hesaplamalardan sonra, Denklem 4.3’te elde edilen gerilim değeri, özgün sistemin güç akış analizinden sonra elde edilen, 20 numaralı baraya ait gerilim ile karşılaştırılmıştır ve gerilimlerin, genliklerinin ve faz açılarının birbirine eşit oldukları gözlemlenmiştir. Böyle bir sonucun elde edilmiş olması ile Ward indirgeme yöntemi kullanılarak oluşturulan eşdeğer sistem ile gerilim temelinde gerçekleştirilecek çalışmaların, özgün sistem üzerinden gerçekleştirilecek çalışmalardan farklı sonuçlara neden olmayacağını ispatlamaktadır. Dolayısıyla, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesaplamalarının, Ward sistemi ile indirgenmiş bir sistem modeli üzerinden yürütülmesinde herhangi bir sakınca bulunmadığı ve Denklem 3.50’nin türetilmesi aşamasında temel alınan yaklaşımın, yapılan çalışma açısından doğru bir yaklaşım olduğu sonucuna varılmıştır.

#### 4.3.2 Bara – 20 için Maksimum İzin Verilebilir DÜ Bağlantı Kapasitesinin İncelenmesi

Çizelge 4.3’te bağlantı noktaları ile verilen yük ve üretici bilgileri göz önünde bulundurulduğunda, 20 numaralı baranın seçimi ile oluşturulan durum senaryosunda, yüklerin ve üreticilerin, seçilen bağlantı noktasına göre yerleşimlerinde çeşitlilik sağlanmış olur. Öyle ki, oluşturulan durum senaryosu neticesinde, yüklerden bir kısmı ( $S_{yük2}$ ,  $S_{yük3}$ ,  $S_{yük4}$ ), bağlantı noktasına göre daha düşük güçlü baralarda, bir kısmı ise

( $S_{Yük1}$ ) daha güçlü baralara konumlandırılmış olacaktır. Diğer taraftan, sistemdeki üreticilerden birisi, ( $S_{DÜ1}$ ), bağlantı noktası gerisinde, diğeri ise ( $S_{DÜ2}$ ) bağlantı noktasının bulunduğu besleme hattından farklı bir besleme hattı üzerinde yer alacaktır.

Oluşturulan durum senaryosuna göre adım adım Denklem 3.50'yi uyguladığımızda, ilk adım, sistemin yüksüz durumda seçilen bara için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin hesaplanması olacaktır. Bu kapasitenin hesabı, tez çalışması kapsamında önerilen Denklem 3.34 ile gerçekleştirilebilir. Bu aşamada, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesaplanacak noktaya ait kısa devre gücü değerinin bilinmesi gerekmektedir. Durum çalışmalarında sistem noktalarına ait kısa devre güçleri ETAP yazılımı gerçekleştirilen kısa devre analizleri neticesinde elde edilmiştir. Pratik uygulamalarda ise bu değer sistem yürütücü tarafından uygulayıcıya sağlanabilmektedir. Yapılan analizler neticesinde 1 MVA ve 11kV baz değerleri için  $S''_{20} = 79.64 \angle 16.28 pu$  olarak elde edilmiştir. Sistem üst gerilim sınırı önceki analizlerde olduğu gibi 1.1 pu ve olarak alınmıştır. Yüksüz durum için söz konusu kapasite hesabını 0.95 geri güç faktörü değerine göre gerçekleştirecek olursak aşağıdaki değer elde edilecektir.

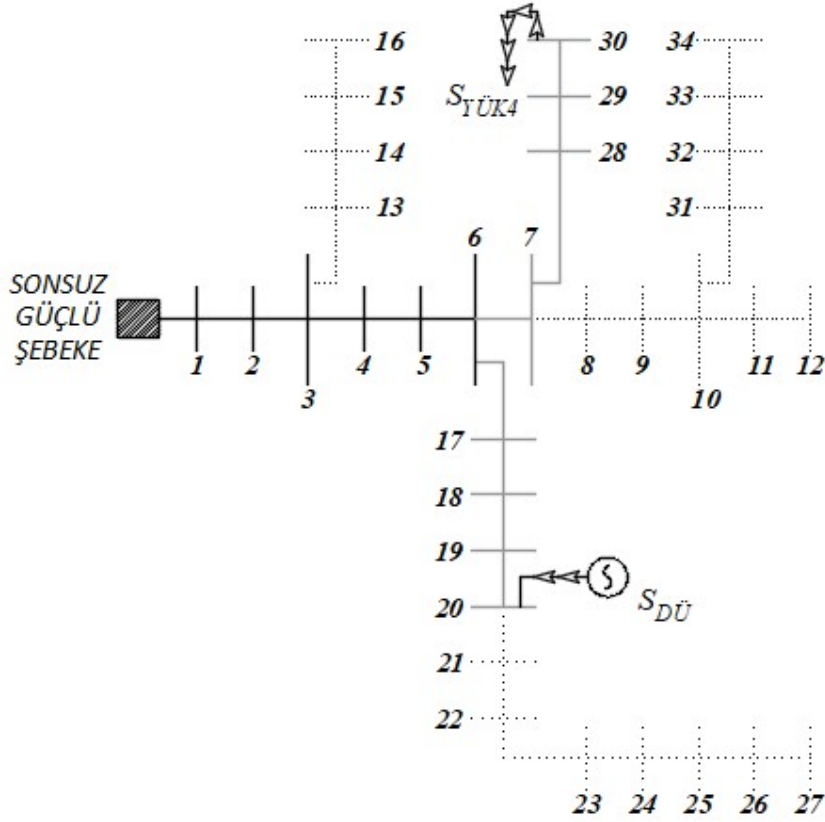
$$S_{DÜ_{20}} = 8.766 \angle 18.19 pu \quad (4.4)$$

Denklem 3.50'de verilen ifadenin ikinci kısmında ise, sistemin indirgenmiş eşdeğeri üzerinden elde edilen ifadelerin yorumlanması ile oluşturulan matematiksel ifadeler yer almaktadır. İlk aşamada yüklere ait hesaplamalar gerçekleştirilecek olursa;

$$\sum_1^n \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} \right)^* S_{Yük_n} \xrightarrow{n=4} \frac{S''_{20}^*}{S''_{OBNyük1}} S_{Yük1} + \frac{S''_{20}^*}{S''_{OBNyük2}} S_{Yük2} + \frac{S''_{20}^*}{S''_{OBNyük3}} S_{Yük3} + \frac{S''_{20}^*}{S''_{OBNyük4}} S_{Yük4} \quad (4.5)$$

ifadesi elde edilir. Burada *OBN* indisi ortak bağlantı noktasını ifade eder. Yüklerin seçilen nokta ile yaptıkları ortak bağlantı noktasının belirlenmesine yönelik, 30 numaralı baraya bağlı yük için örnek bir yaklaşım aşağıdaki şekil üzerinden gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere, Bara - 20 ile Bara - 30, 6 numaralı bara üzerinden ortak bağlantı yapmaktadır. Yapılacak hesaplamalarda, ortak bağlantı noktasına ait kısa devre gücü dikkate alınacaktır. Dolayısıyla, Yük - 1 için Bara - 5, Yük - 2 ve Yük - 4 için Bara - 6, Yük - 3 için ise Bara - 20 ortak bağlantı noktalarını ifade etmektedir.





Şekil 4.8 Ortak bağlantı noktasının belirlenmesine yönelik görsel

Belirlenen ortak bağlantı noktalarına ait kısa devre güçleri Çizelge – 4.4 ile verilmiştir.

Çizelge 4-4 Ortak bağlantı noktalarına ait kısa devre güçleri

$S''_5 = 206.34 \angle 19.39 \text{ pu}$
$S''_6 = 159.89 \angle 18.51 \text{ pu}$
$S''_{20} = 79.64 \angle 16.28 \text{ pu}$

Çizelge 4.4 esas alınarak Denklem 4.5 çözüldüğünde;

$$\sum_1^n \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} \right)^* S_{Yük_n} \stackrel{n=4}{\Rightarrow} 1.134 \angle 18.02 \text{ pu} \quad (4.6)$$

Denklem 3.50'ye ait son kısım olan, sistemdeki üreticilerin maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi üzerindeki etkisini veren kısmın hesaplaması ise aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

$$\sum_1^k \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜk}} \right)^* S_{DÜk} \xrightarrow{k=2} \frac{S''_{20}^*}{S''_{DÜ1}^*} S_{DÜ1} + \frac{S''_{20}^*}{S''_{DÜ2}^*} S_{DÜ2} \quad (4.7)$$

Denklem 4.7'den görüleceği üzere, sistemdeki üreticiler hesaplamalara katılırken, yüklerdeki gibi ortak bağlantı noktası yerine, bağlı oldukları noktanın kısa devre gücü dikkate alınarak incelenir. DÜ – 1 üreticisi, 22 numaralı baraya, DÜ – 2 üreticisi ise 34 numaralı baraya bağlı bulunmaktadır. Bu baralara ait kısa devre güçleri Çizelge 4.5'teki gibidir.

Çizelge 4-5 Sistemdeki dağıtık üreticilerin bağlı oldukları baralara ait kısa devre güçleri

$S''_{22} = 58.95 \angle 15.07 \text{ pu}$
$S''_{34} = 51.57 \angle 12.57 \text{ pu}$

Çizelge 4.5 esas alınarak Denklem 4.7 çözüldüğünde;

$$\sum_1^k \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜk}} \right)^* S_{DÜk} \xrightarrow{k=2} 5.983 \angle 26.28 \text{ pu} \quad (4.8)$$

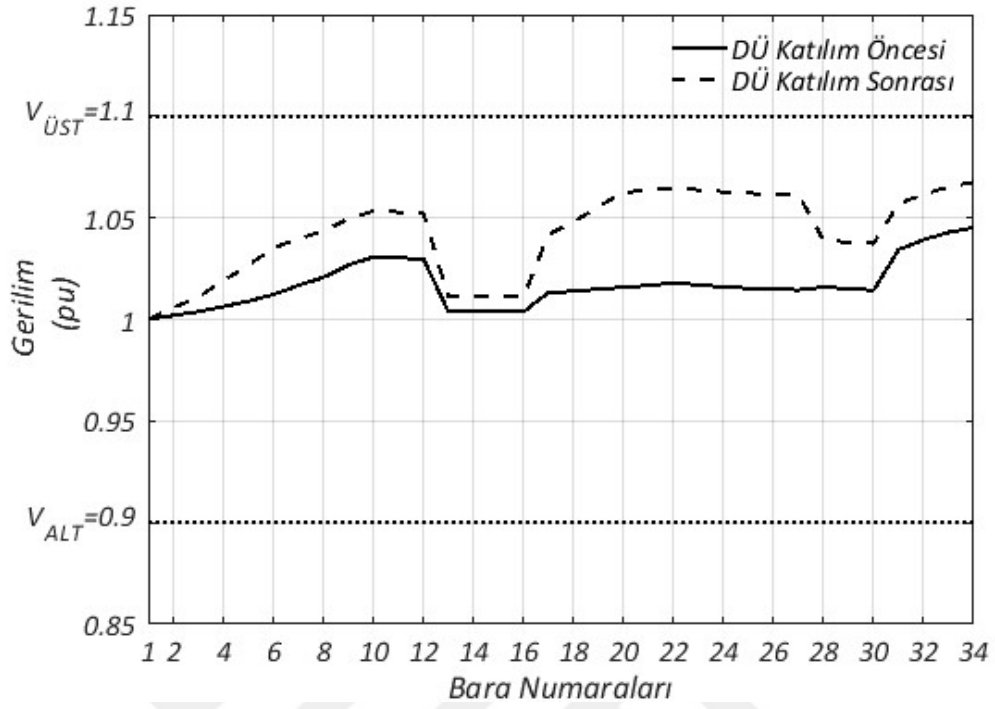
eşitliği elde edilir.

Denklem 3.50'ye ait bileşenler bir araya getirildiğinde, sistemin 20 numaralı barasına ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

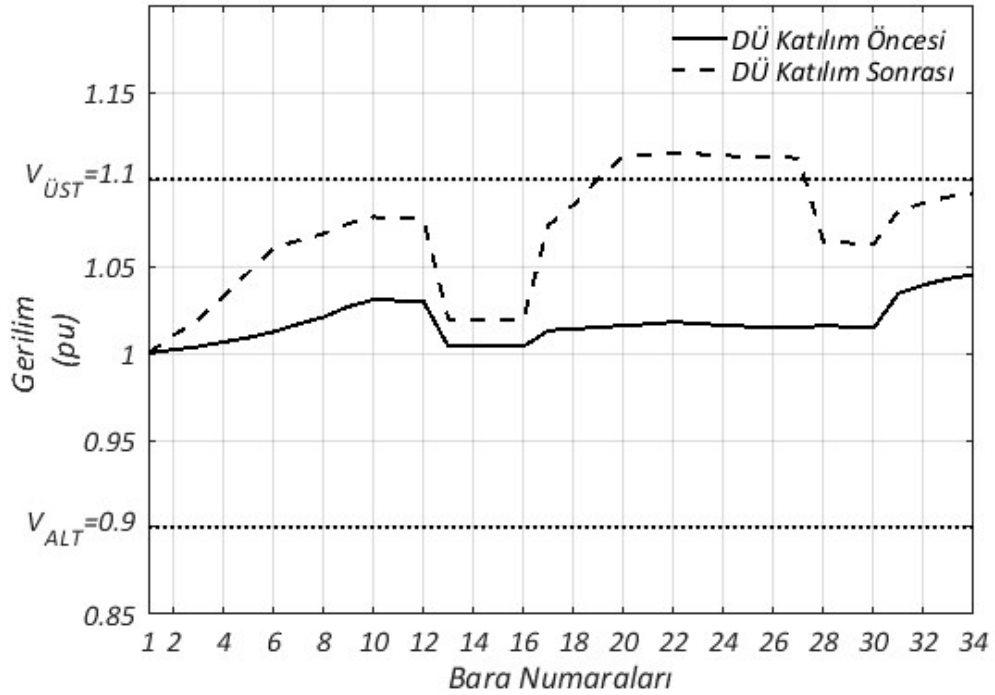
$$S'_{DÜ} = (8.766 \angle 18.19) + (1.134 \angle 18.02) - (5.983 \angle 26.28) \quad (4.9)$$

$$S'_{DÜ} = 4.065 \angle 6.19 \text{ pu} \quad (4.10)$$

Sistemin minimum yükte ve maksimum üretimde olduğu duruma ait sistem gerilimleri ve elde edilen değerde bir DÜ birimin sisteme dâhil edilmesinden sonraki durum için sistem baralarında oluşacak gerilimler Şekil – 4.9 verilen çizim üzerinden karşılaştırılmıştır. Şekilden de görüleceği üzere, Denklem 4.50 kullanılarak hesaplanan kapasite değerinde bir dağıtık üreticinin sisteme dahil edilmesi sistemde herhangi bir aşırı gerilim oluşturmamaktadır.



Şekil 4.9 Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler



Şekil 4.10 Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler

Minimum yük ve maksimum üretim durumları Çizelge 4.3'teki gibi olan bir sistemin belli bir noktası için maksimum izin verilebilir bağlantı kapasitesi değeri, sistemin yüksüz olduğu durum esas alınarak hesaplanmış olsaydı, Denklem 4.4'teki değer elde edilecekti. Bu değerde bir dağıtık üreticinin söz konusu noktadan sisteme dâhil edilmesi durumunda ise, sistem gerilimler Şekil 4.10'da verildiği gibi olacaktı. Şekilden de görüldüğü üzere, sistemde bazı baralarda aşırı gerilim sorunları söz konusudur.

Şekil 4.9'a geri dönecek olursak, Denklem 3.50 ile elde edilen değerde bir dağıtık üreticinin sisteme dahil edilmiş olması sisteme gerilim sınırlarını zorlamayacak şekilde bir etki oluşturmuştur. Şekilden de anlaşılacağı üzere, herhangi bir sakınca olmaksızın, Bara -20 noktasına bağlanan dağıtık üreticinin kapasite değeri bir miktar daha arttırılabilir. Bu durumda şunu söyleyebiliriz ki; Denklem 3.50 ile elde edilen kapasite değeri, gerçek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değerinden daha azdır. Bunun sebebi, Denklem 3.50'nin türetilmesinde, yüklerin ve üreticilerin bağlantı noktalarının gerilimlerinin kesin olarak bilinmemesi neticesinde, bu gerilimlerin temkinli yaklaşımlar çeşitli değerlerde olduklarına dair kabullerin yapılmış olmasıdır. İncelenen senaryo için kabul edilen değerler, gerçek değerlere uzak kalmış olduğundan dolayı, elde edilen kapasite değeri gerçek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değerine eşit elde edilememiştir. Ancak bir başka durum senaryosunda, bu durum farklı olabilir. Önerilen matematiksel modelin başarısı, tüm durum senaryolarını kapsayan bir ifade sunması gereğiyle, sistem durum değişkenleri ne olursa olsun, incelenen noktaya ait gerçek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinden daha yüksek bir değer vermeyecek olmasıdır.

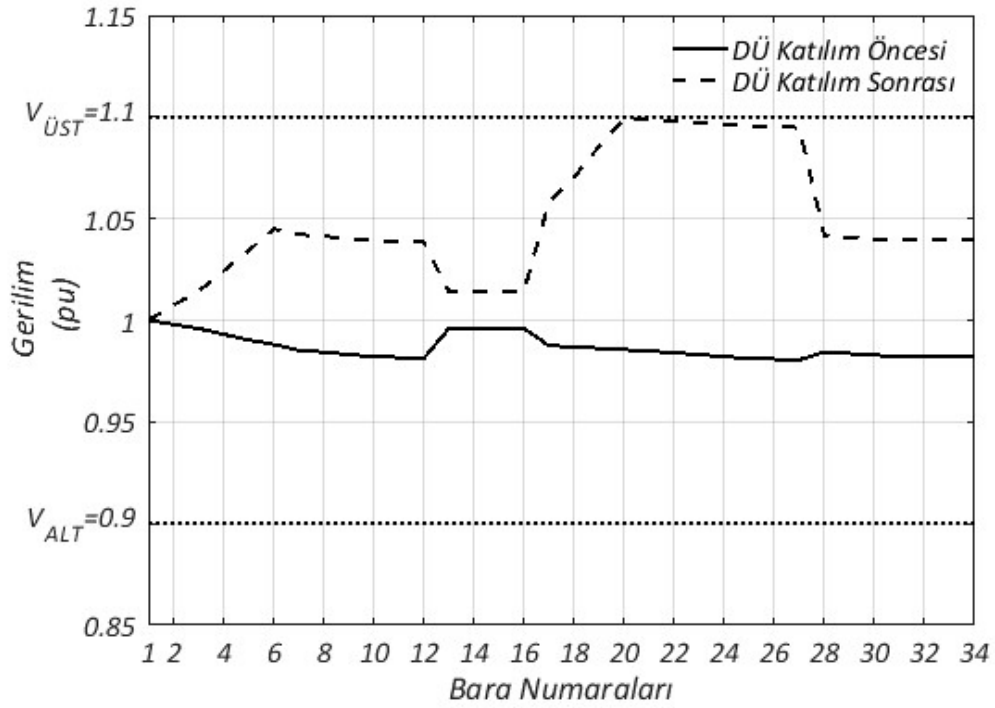
Farklı bir durum senaryosu üzerinde önerilen matematiksel modeli test etmek amacıyla, sistemin minimum yüklü durumu için Bara – 20'ye ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesaplanabilir. Bu durum senaryosunda, sistemde üreticiler bulunmadığından dolayı, Denklem 4.4 ve 4.6'da elde edilen değerler kullanılarak söz konusu kapasite değeri hesaplanabilir.

$$S'_{DÜ} = S_{DÜ_{20}} + \sum_1^n \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{OBNn}} \right)^* S_{Yük_n} \quad (4.11)$$

$$S'_{DÜ} = (8.766 \angle 18.19) + (1.134 \angle 18.02) \quad (4.12)$$

$$S'_{DÜ} = 9.900 \angle 18.17 \quad (4.13)$$

Elde edilen maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değerinde bir DÜ birim, sistemin minimum yüklü durumunda, 20 numaralı baradan sisteme dâhil edildikten sonra elde edilen gerilimler Şekil 4.11'de verilen çizimdeki gibidir. Yine aynı çizim üzerinde, sistemin minimum yüklü durumuna ait gerilim değerleri verilmiştir.

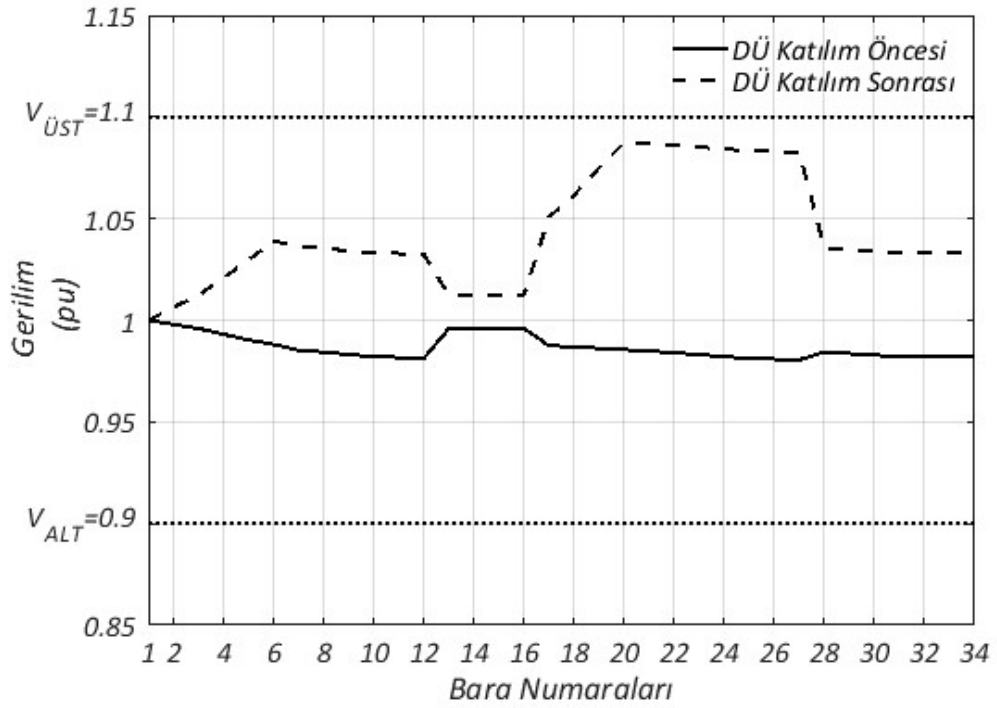


Şekil 4.11 Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler

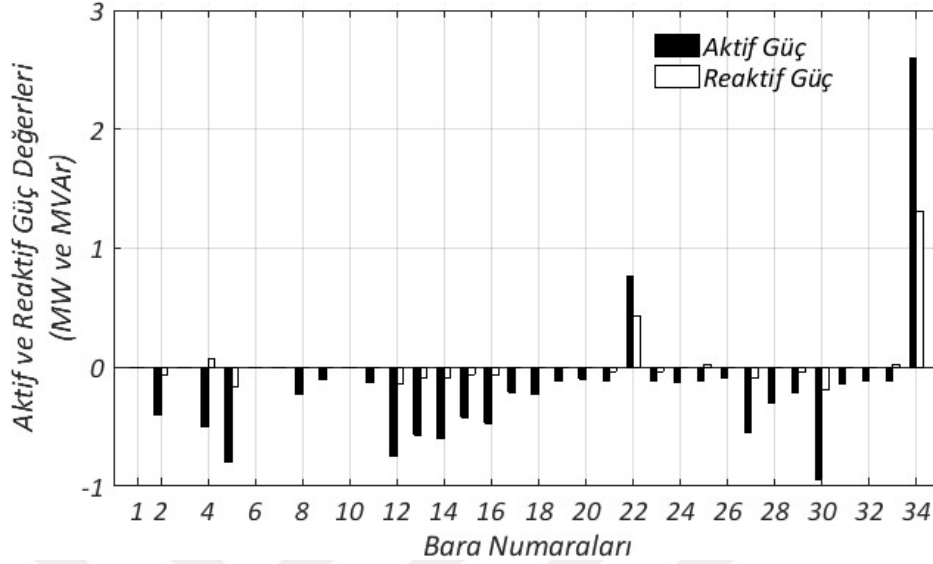
Çizimden de görüldüğü üzere, önerilen matematiksel model, Denklem 3.50, ile hesaplanan kapasite, sistemde herhangi bir şekilde aşırı gerilim sorunlarına neden olmamıştır. Bunun yanı sıra, minimum yük – maksimum üretim durum senaryosu ile minimum yük durum senaryosu gerçekleştirilen hesaplamalar ve elde edilen sonuçlar açısından karşılaştırıldığında, önerilen denklemin başarısının minimum yük durum senaryosunda daha yüksek olduğu anlaşılacaktır. Minimum yük durum senaryosu için, Denklem 3.50 ile elde edilen maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değeri (bkz.

Denklem 4.13 ile verilen eşitlik), aynı senaryo için Denklem 3.34 ile elde edilen kapasite değerinden (bkz. Denklem 4.4) daha yüksektir ve bu kapasitede bir DÜ birim sisteme bağlandığında, üst gerilim sınırına yakın gerilim değerleri elde edilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere, Denklem 3.50 ile yapılan hesaplamalarda, gerçek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesine daha yakın bir değer elde edilmiş olduğu anlaşılacaktır.

Sistemin yüksüz durumunu esas alan yaklaşım ile türetilen Denklem 3.34 kullanılarak, aynı durum senaryosu incelendiğinde, Şekil 4.12'deki gerilimler elde edilmiştir.



Şekil 4.12 Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler

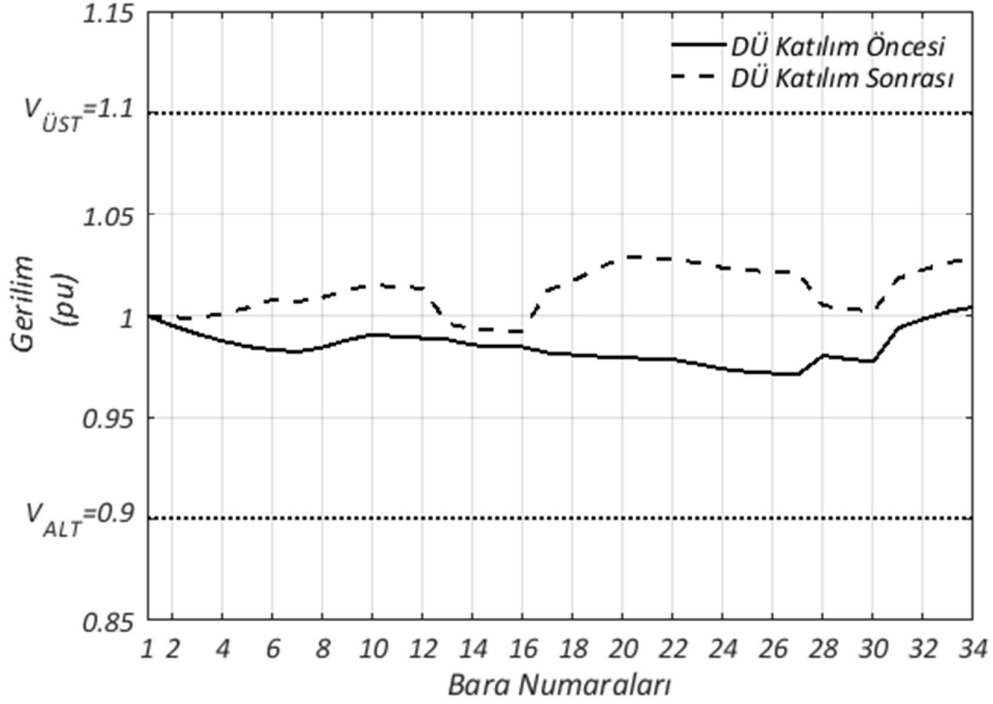


Şekil 4.13 Örnek Yükleme Verileri

Önerilen matematiksel modellerin, sistemin en kötü durum senaryoları dışında, herhangi bir normal işletme anı için incelenmesi yapılan durum analizlerinden elde edilecek sonuçlara katkıda bulunacaktır. Sistemdeki tüketim ve üretim için normal çalışma koşulları altındaki herhangi bir ana ait yük ve üretici bilgileri Şekil 4.13 ile verilmiştir. Bu örnek yüklenme durum senaryosu oluşturulurken, hiç bir bara için, minimum yük değerinden daha düşük yüklenmeye ve maksimum üretimden daha yüksek üretime izin verilmemiştir.

Şekil 4.13'te verilen yük ve üretim bilgilerine ek olarak, sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumu için, Denklem 3.50 ile hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinde bir dağıtık üretici sisteme 20 numaralı baradan dahil edilmiştir. Böylece, minimum yük ve maksimum üretim durumuna göre hesaplanan kapasitede bir katılımın, herhangi bir normal çalışma koşulları altındaki sistem durumunda ne gibi etkiler oluşturacağı gözlemlenebilecektir. Sistemin normal çalışma koşulları altındaki örnek bir yüklenmesi üzerinden oluşturulan durum senaryosu ile gerçekleştirilen analizler sonucu, Şekil 4.14 ile verilen gerilimler elde edilmiştir. Hesaplanan kapasitede bir dağıtık üreticinin sisteme dahil edilmesi öncesine ve sonrasına ait gerilimler çizimde verildiği gibidir. Verilen çizimdeki gerilimler incelendiğinde, sistemdeki yüklerin artışı ile, Denklem 3.50 ile minimum yük ve

maksimum üretim durum senaryosu için hesaplanan kapasitede bir dağıtık üreticinin sistemde oluşturduğu gerilimler azalacaktır.



Şekil 4.14 Örnek yüklenme durumunda Denklem 3.50 ile elde edilen kapasitede bir DÜ'nün sistem eklenmesi öncesinde ve sonrasında gerilim değerleri

#### 4.3.3 Bara – 3 için Maksimum İzin Verilebilir DÜ Bağlantı Kapasitesinin İncelenmesi

Önerilen matematiksel modelin doğruluğunun ve diğer matematiksel modeller karşısındaki üstünlüğünün ikinci bir bağlantı noktası seçimi ile test edilmesi elde edilen bulguları sağlamlaştıracaktır. Bu amaçla, ikinci bağlantı noktası olarak, Bara – 20'ye nazaran sonsuz güçlü şebeke noktasına daha yakın ve haliyle daha güçlü bir bağlantı noktası olan Bara – 3 seçilmiştir. Çizelge 4.3 ile verilen yüklerin tamamı bu bağlantı noktasının gerisinde kalmaktadır ve dolayısıyla bu yükler ile seçilen bağlantı noktası için ortak bağlantı noktası, Bara – 3 olacaktır.

Bara – 20 için gerçekleştirilen durum analizlerinde izlenen adımların birer birer tekrarlanacak olursa, ilk adım Denklem 3.50'deki ilk terim olan yüksüz ve üretimsiz durum için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin hesaplanması olacaktır. Bu kapasitenin hesabı, yine tez kapsamında önerilen Denklem 3.34 ile gerçekleştirilebilir.



Bu aşamada ihtiyaç duyulan sistem bilgileri arasında, hesaplamaların yapılacağı noktaya ait kısa devre gücü ve bu güce ait faz açısıdır. Bara -20 için gerçekleştirilen durum analizlerinde olduğu gibi sisteme ait bu veriler ETAP yazılımı üzerinden modellenen test sisteminde gerçekleştirilecek kısa devre analizleri ile elde edilmiştir. Güç ve gerilimler için yine aynı baz değerleri seçilecek olursa, yapılan analizler neticesinde elde edilen kısa devre gücü  $S_3'' = 490.03 \angle 24.74 pu$  olmuştur. Sistem üst gerilim sınır 1.1 pu ve incelenecek kapasite için 0.95 geri güç faktörü esas alınmıştır.

$$S_{DÜ_3} = 54.293 \angle 18.19 pu \quad (4.14)$$

Denklem 3.50'nin ikinci teriminde ise sistemdeki yüklerin seçilen bağlantı noktasının yüksüz ve üretimsiz durumdaki maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi üzerindeki etki değerinin hesaplaması yer almaktadır. Bu değer ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sum_1^n \left( \frac{S_{DÜ}''}{S_{OBNn}''} \right)^* S_{Yük_n} \xrightarrow{n=4} \frac{S_3''^*}{S_{OBNyük1}''} S_{Yük_1} + \frac{S_3''^*}{S_{OBNyük2}''} S_{Yük_2} + \frac{S_3''^*}{S_{OBNyük3}''} S_{Yük_3} + \frac{S_3''^*}{S_{OBNyük4}''} S_{Yük_4} \quad (4.15)$$

Daha öncesinde belirtildiği gibi, seçilen bağlantı noktası, sistemdeki yüklerin ve üreticilerin önünde yer almaktadır. Bu nedenle tüm yükler için seçilen bağlantı noktası ile ortak bağlantı Bara – 3 üzerinde gerçekleştirilmektedir. Ortak bağlantı noktası, Bara – 3, için kısa devre gücü yukarıda belirtilmişti. Bu değer esas alınarak Denklem 4.15'teki ifade hesaplandığında aşağıdaki değer elde edilir.

$$\sum_1^n \left( \frac{S_{DÜ}''}{S_{OBNn}''} \right)^* S_{Yük_n} \xrightarrow{n=4} 1.991 \angle 17.52 pu \quad (4.16)$$

Denklem 3.50'nin üçüncü teriminde ise, sistemdeki üreticilerin seçilen bağlantı noktasının yüksüz ve üretimsiz durumdaki maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi üzerindeki etki değerinin hesaplaması yer almaktadır. Bu değer ise aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sum_1^k \left( \frac{S_{DÜ}''}{S_{DÜk}''} \right)^* S_{DÜ_k} \xrightarrow{k=2} \frac{S_3''^*}{S_{DÜ_1}''} S_{DÜ_1} + \frac{S_3''^*}{S_{DÜ_2}''} S_{DÜ_2} \quad (4.17)$$

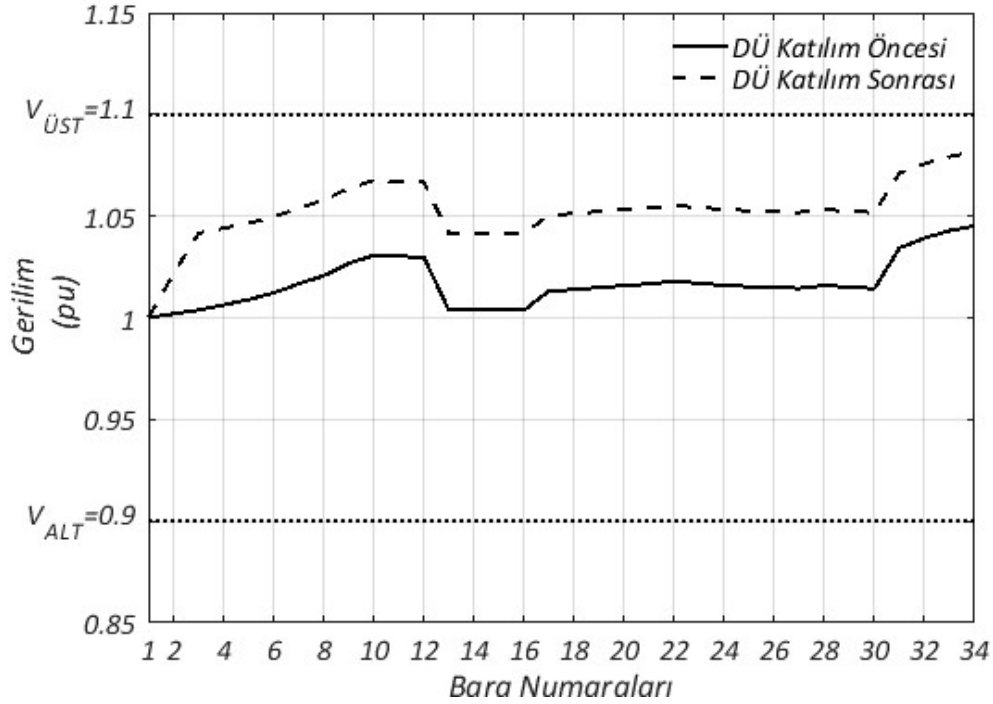
Sistemdeki üreticilerin bağlı oldukları noktalara ait kısa devre güçleri, Bara – 20 için gerçekleştirilen durum analizleri esnasında hesaplamalarda kullanılmak üzere edinilmiş ve Çizelge 4.5 ile verilmiştir.

$$\sum_1^k \left( \frac{S''_{DÜ}}{S''_{DÜk}} \right)^* S_{DÜk} \stackrel{k=2}{\Rightarrow} 36.813 \angle 14.23 \text{ pu} \quad (4.18)$$

Bara – 3 için hesaplanan Denklem 3.50'ye ait bileşenler bir araya getirildiğinde, Denklem 4.20 ile verilen değer elde edilir.

$$S'_{DÜ} = (54.293 \angle 18.19) + (1.991 \angle 17.52) - (36.813 \angle 14.23) \quad (4.19)$$

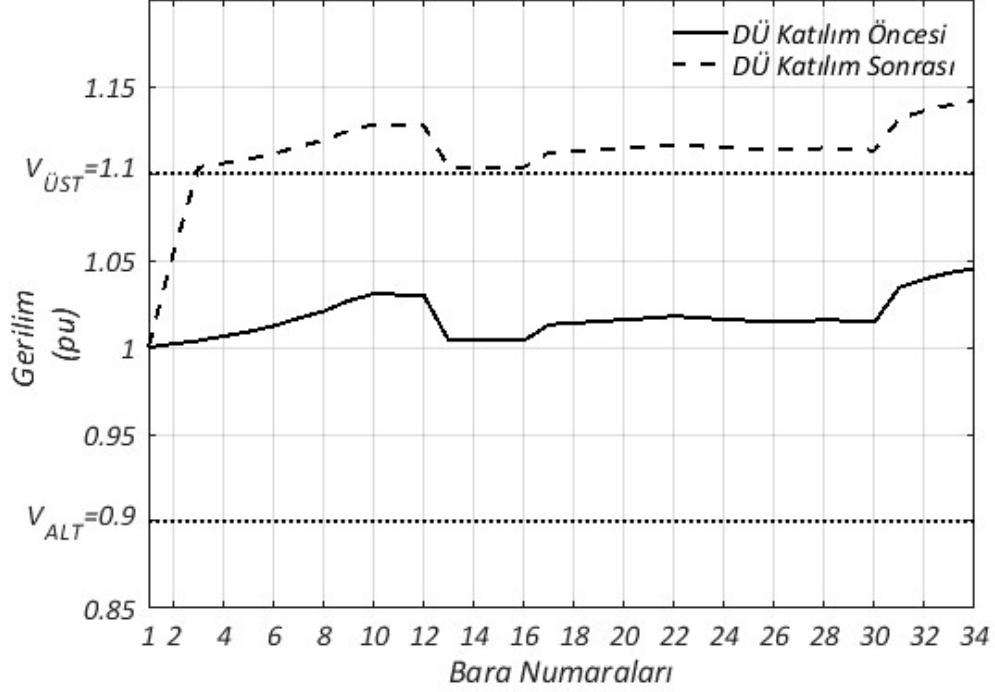
$$S'_{DÜ} = 19.72 \angle 25.52 \text{ pu} \quad (4.20)$$



Şekil 4.15 Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dâhil edilmeden önceki ve dâhil edildikten sonraki gerilimler

Sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumu esas alındığında, Bara – 3 için Denklem 3.50 kullanılarak elde edilen maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinde bir üretici, belirtilen baradan sisteme bağlanmıştır. Bağlantı öncesi ve sonrasına ait sistem baralarının alacakları gerilim değerleri, güç akış analizleri ile Şekil –

4.15'teki gibi elde edilmiştir. Görüldüğü üzere Denklem 3.50 ile elde edilen kapasitede bir DÜ katılımı sonrasında sistemin hiç bir barasında aşırı gerilim sorunları yaşanmamaktadır.



Şekil 4.16 Sistemin yüklü ve üreticili durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dâhil edilmeden önceki ve dâhil edildikten sonraki gerilimler

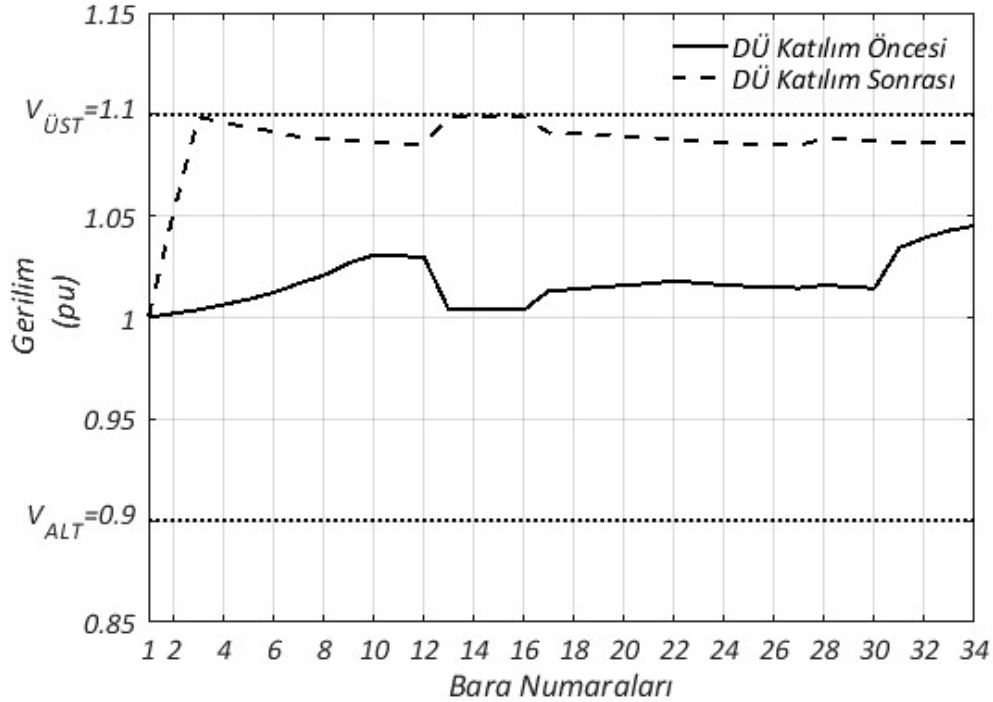
Sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumuna ait senaryoda aynı kapasite değerinin Denklem 3.34 ile hesaplanması neticesinde elde edilen kapasitede bir DÜ'nün sisteme katılması durumunda elde edilecek gerilimler Şekil 4.16'da verilmiştir. Sistemin yüksüz ve üretimsiz durumunu esas alarak hesaplamalar, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesabı yapan Denklem 3.34'ten elde edilen kapasite, sistemin tüm baralarında, izin verilebilir üst gerilim sınırının ötesinde gerilimlerin oluşmasına neden olmuştur. Öyle ki, Bara – 20 için yapılan analizlerde, sadece bölgesel aşırı gerilimlere neden olacak büyüklükte bir kapasite sonucu veren Denklem 3.34, sonsuz baraya yakın bir bağlantı noktasında daha kötü sonuçlar vermiştir. Ancak Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasite değerlerinde katılımların sonrasındaki durumlar incelendiğinde, istikrarlı bir tutarlılık olduğu anlaşılmaktadır.

Sistemde üreticilerin bulunmaması durumunda, sistem içerisinde bir noktaya ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesaplanırken sistemin minimum yüklü durumunun dikkate alınması en doğru yaklaşım olacaktır. Sistemde üreticileri bulunmadığı durum için Bara – 3’e ait söz konusu kapasite değerinin Denklem 3.50 ile hesaplanması neticesinde, Denklem 4.22’deki değer elde edilecektir

$$S'_{DÜ} = (54.293 \angle 18.19) + (1.991 \angle 17.52) \quad (4.20)$$

$$S'_{DÜ} = 56.284 \angle 18.17 \quad (4.21)$$

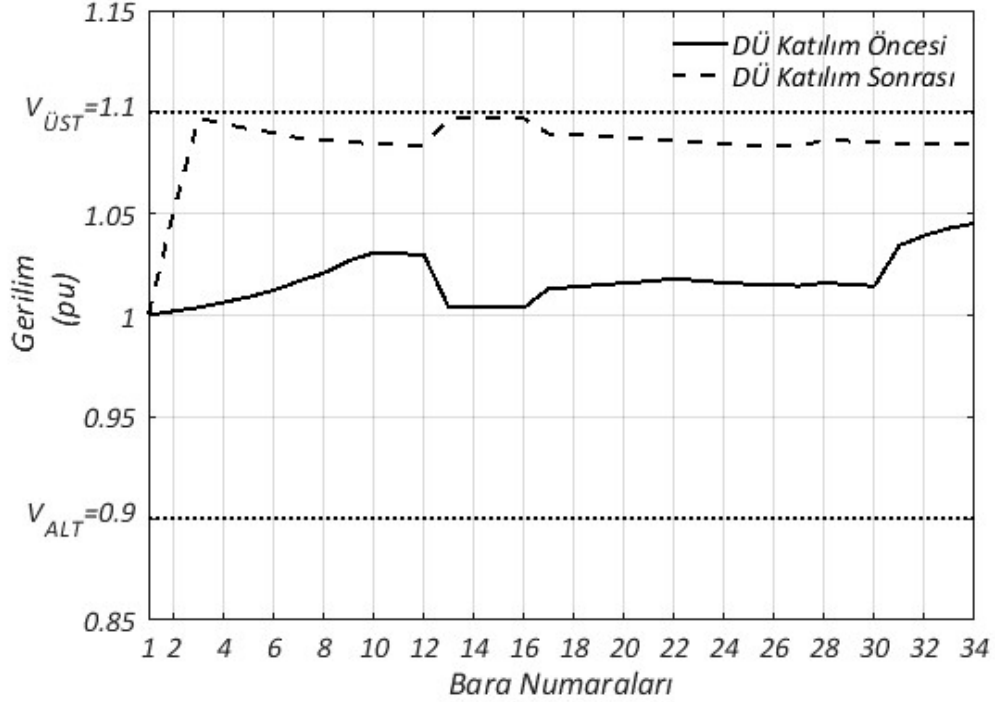
Elde edilen kapasite değerinde bir dağıtık üretici Bara – 3’ten sisteme bağlandığında, elde edilecek gerilimler Şekil 4.17’deki gibidir.



Şekil 4.17 Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.50 ile hesaplanan kapasitede DÜ’nün sisteme dâhil edilmeden önceki ve dâhil edildikten sonraki gerilimler

Denklem 3.34 ve sistemin yüksüz durumunu esas alan diğer tüm matematiksel modeller, sistemdeki yüklerin veya üreticilerin varlığını dikkate almadıklarından dolayı farklı durum analizleri için aynı sonucu verecektir. Sistemin minimum yüklü durumunda, Denklem 3.34 ile elde edilen kapasitede bir DÜ, Bara – 3’ten sisteme bağlandığında Şekil 4.18’de

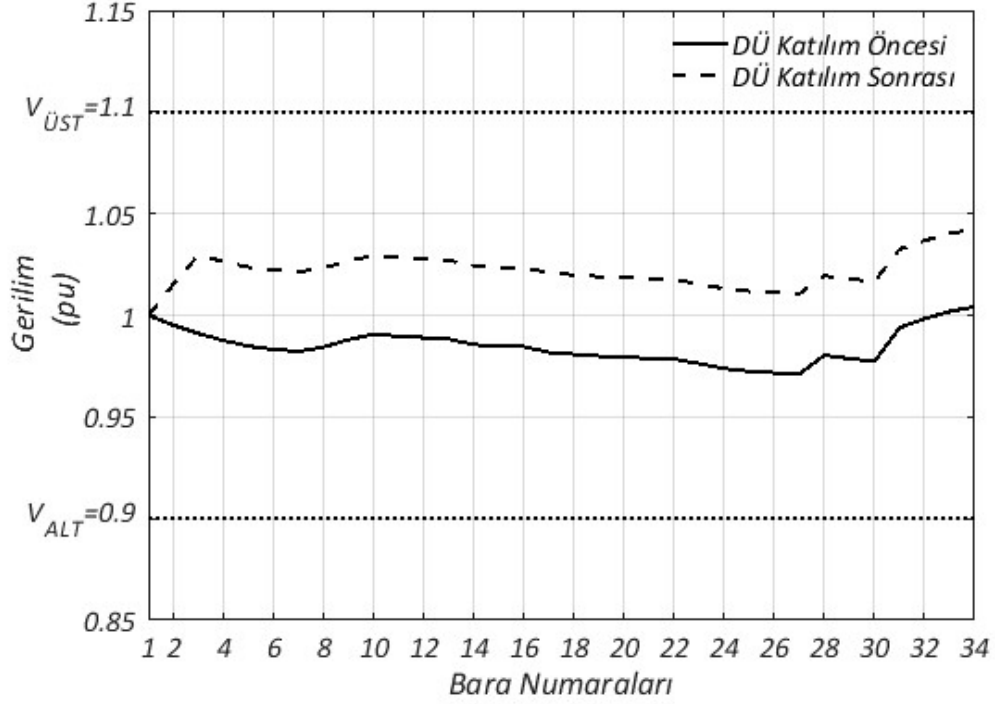
verilen gerilimleri oluşturacaktır. Şekil 4.17 ve 4.18 karşılaştırıldığında, Denklem 3.50 ile elde edilen kapasitede bir katılım sonrasında, bağlantı noktası gerilimin 1.1 pu gerilim değerini almış olduğu gözlemlenebilir. Denklem 3.34 ile elde edilen kapasite ise bu gerilimin altında bir değer oluşturabilmiştir. Dolayısıyla, Denklem 3.50'nin ile hesaplanan kapasite değerinin, söz konusu durum için gerçek maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesini hesaplayabilmiş olduğu söylenebilir.



Şekil 4.18 Sistemin yüklü durum senaryosu için Denklem 3.34 ile hesaplanan kapasitede DÜ'nün sisteme dahil edilmeden önceki ve dahil edildikten sonraki gerilimler

Sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumu için Denklem 3.50 ile hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinde bir dağıtık üretici, Şekil 4.13 ile verilen örnek yüklenme durumunda sisteme dahil edildiğinde, sistem baralarındaki gerilimler Şekil 4.19'daki gibi olur. Görüleceği üzere, minimum yük ve maksimum üretim durumu için hesaplanan kapasite değeri, sistemin örnek yüklenme durumunda aşırı gerilimlere neden olmamıştır. Hesaplamalarda benimsenen yaklaşımda, hesaplanacak kapasitenin, sistemin minimum yük ve maksimum üretim durumu için, sistem baralarında izin verilebilir üst gerilim değerini oluşturabilecek yeterlilikte olması esas

alınır. Sistemin herhangi bir anında, maksimum üretimden daha yüksek bir üretimin oluşamayacağı göz önünde bulundurulduğunda, sistemin artan yüklenmesi ancak ve ancak sistem baralarındaki gerilimi düşürecektir. Haliyle, Şekil 4.19'da paylaşılan gerilimler de bu durumu tasdik etmektedir.



Şekil 4.19 Örnek yüklenme durumunda Denklem 3.50 ile elde edilen kapasitede bir DÜ'nün sistem eklenmesi öncesinde ve sonrasında gerilim değerleri

Literatürdeki alternatif matematiksel modeller ve tez çalışmasında önerilen matematiksel modeller üzerinde yapılan genel bir karşılaştırma, Çizelge 4.6'da verildiği gibidir. Tüm matematiksel modellerden değer alabilmek amacıyla, birim güç faktörü ile DÜ katılımları göz önünde bulundurularak maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi değeri hesaplanmıştır. Elde edilen her bir kapasite için, o kapasite değerinde bir DÜ birimi, minimum yük ve maksimum üretim çalışma durumundaki sisteme bağlanır ve bağlantı sonrasında sistemde oluşan en yüksek gerilim değeri not edilir.

Çizelge 4-6 Genel karşılaştırma tablosu

Matematiksel Modeller	Bara – 20		Bara – 3	
	<i>Maks. İzin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi (MVA)</i>	<i>DÜ bağlantı sonrasında sistemde oluşan en yüksek gerilim</i>	<i>Maks. İzin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi (MVA)</i>	<i>DÜ bağlantı sonrasında sistemde oluşan en yüksek gerilim</i>
<i>Eşitlik (3.15)</i>	<b>8.41</b>	<b>1.108 pu</b>	<b>48.95</b>	<b>1.123</b>
<i>Eşitlik (3.22)</i>	<b>8.30</b>	<b>1.107 pu</b>	<b>55.37</b>	<b>1.132</b>
<i>Eşitlik (3.23)</i>	<b>9.13</b>	<b>1.115 pu</b>	<b>59.35</b>	<b>1.138</b>
<i>Eşitlik (3.34)</i>	<b>9.17</b>	<b>1.116 pu</b>	<b>59.99</b>	<b>1.139</b>
<i>Eşitlik (3.50)</i>	<b>5.39</b>	<b>1.079 pu</b>	<b>27.54</b>	<b>1.089</b>

Görüldüğü üzere, sistemin yüksüz çalışma durumu esas alınarak türetilen matematiksel modeller arasında, en yüksek kapasite değerini veren matematiksel model, tez kapsamında önerilen matematiksel modeldir, (3.34). Ancak, bu matematiksel modeller ile hesaplanan her bir kapasite değeri için bir DÜ birimi, minimum yük ve maksimum üretim çalışma koşullarında sisteme bağlanarak sistem gerilimleri incelendiğinde, her seferinde aşırı gerilimlerin oluştuğu görülmektedir. Çünkü sistemdeki üreticiler dikkate alınmamaktadır. Diğer taraftan, sistemdeki yükleri ve üreticileri dikkate alan matematiksel model (3.50) ile elde edilen kapasitede bir DÜ birim ilgili noktadan sisteme bağlandığında, herhangi bir aşırı gerilim probleminin gerçekleşmediği görülmüştür.

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında, radyal bir güç sistemi içerisinde bir noktadan, sistemde aşırı gerilim sorunları oluşturmaksızın dâhil edilebilecek maksimum DÜ bağlantı kapasitesinin matematiksel bir model üzerinden belirlenebilmesi amaçlanmıştır. Maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi olarak isimlendirilen bu değer hesaplanabilmesi amacı ile literatürden farklı çalışmalar ile çeşitli matematiksel modeller önerilmiştir. Bu çalışmalarda önerilen matematiksel modeller, bir takım varsayımlar ve ihmaller üzerinden sorunu ele almaktadırlar. Bunun yanısıra, bu matematiksel modellerin tamamı, sistemin yüksüz ve üreticisiz çalışma durumu esas alınarak türetilmişlerdir. Tez çalışmasının ilk kısmında, literatürdeki matematiksel modellerin türetilmesi aşamasında kabul edilen varsayımlar ve ihmaller olmaksızın, sistemin yüksüz çalışma durumunu esas alan yeni bir matematiksel model geliştirilmesi yönünde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmaların neticesinde elde edilen matematiksel model, (3.34), 34 baralı radyal test sistemi üzerinde, diğer matematiksel modeller ile birlikte uygulanmıştır. Her bir matematiksel model ile sistem içerisinde bir nokta için hesaplanan maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinde bir DÜ birim, hesaplamaların gerçekleştirildiği noktadan sisteme dâhil edilmiş ve sonrasında sistemin güç akış analizi çalışılmıştır. Farklı bağlantı noktaları ve bağlantı koşulları için durum analizleri çeşitlendirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde, geliştirilen matematiksel model, (3.34), kullanılarak elde edilen maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin, diğer matematiksel modeller kullanılarak elde edilen değerlerden daha doğru ve tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır.



Önerilen matematiksel model ile gerçekleştirilen hesaplamalarda bağlantı noktası gerilimi için esas alınan değer ile hesaplamalar sonrasında elde edilen kapasitede bir DÜ birimin, ilgili noktadan sisteme dâhil edilmesi sonrasındaki durum için gerçekleştirilen güç akış analizleri neticesinde elde edilen bağlantı noktası gerilim değerinin eşit olduğu gözlemlenmiştir. Önerilen matematiksel modelin bu başarısı, belirlenen tüm bağlantı noktaları ve incelenen tüm bağlantı koşulları için sağlanmıştır. Bunun yanısıra, önerilen matematiksel model, daima, alternatiflerinden daha yüksek sonuçlar vermiştir. Öyle ki, Bara – 5 için, 0.9 ileri güç faktöründe bağlantı durumu esas alınarak yapılan incelemelerde, performans açısından önerilen matematiksel modele en yakın olan MM-3, (3.23), önerilen matematiksel model ile hesaplanan değerden yaklaşık %6 daha az bir kapasite değerinde sonuç verebilmiştir, Çizelge 4.2.

Çalışmanın ikinci aşamasında, sistem içerisindeki yüklerin ve üreticilerin maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi üzerindeki etkilerinin uygun bir yaklaşım ile hesaplamalara dâhil edilmesi ve bu işlevi yerine getirebilecek bir matematiksel modelin geliştirilmesi amaçlanmıştır. İçerisinde yüklerin ve üreticilerin bulunduğu bir sistem için maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesi hesaplamalarında, sistemde aşırı gerilimler açısından en kötü senaryoya karşılık gelen, minimum tüketim ve maksimum üretim durumunun esas alınması uygun görülmüştür. Sistemin yüklü ve üreticili durumunun, yüksüz çalışma koşullarına benzetilebilmesi amacıyla, sistemdeki yüklerin ve üreticilerin, bağlantı noktası üzerindeki eşdeğerleri ile dikkate alınmasının uygun bir yaklaşım olacağı öngörülmüştür. Bu eşdeğerlerin elde edilmesi aşamasında ağ indirgeme tekniklerinden faydalanılmıştır. Yapılan çalışmalar neticesinde elde edilen matematiksel ifade, temkinli yaklaşımlar üzerinden gerçekleştirilen kabuller ile sistemin yüklü ve üreticili durumu için herhangi bir noktaya ait maksimum izin verilebilir DÜ bağlantı kapasitesinin hesaplamalarında kullanılabilecek bir matematiksel model, (3.50), haline gelmiştir.

Sistem içerisindeki yükleri ve üreticileri dikkate alabilmesi açısından, literatürde herhangi bir alternatifi olmayan matematiksel model, 34 baralı test sistemi üzerinden farklı bağlantı noktaları ve bağlantı koşulları için test edilmiştir. Elde edilen değerler, yüksüz çalışma durumu esas alınarak türetilen matematiksel modeller arasından en başarılısı ve tez içeriğinden önerilmiş olan, (3.34) kullanılarak elde edilen değerler ile

karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, (3.34) kullanılarak hesaplanan kapasiteler, sistemde aşırı gerilimlere neden olmaktadır. Eşitlik (3.50) kullanılarak elde edilen kapasiteler ise daima uygun değerleri verebilmiştir. Yapılan analizler ve incelemeler neticesinde, maksimum izin verilebilir DÜ bağlantısı, eşitlik (3.50) ile önerilen matematiksel modelin kapsayıcılığı ve tutarlılığı diğer alternatiflerine kıyasla oldukça yüksektir.

Tez çalışmasında önerilen matematiksel modeller, elektrik şebekeleri ile ilgili mevzuatlarda, sisteme katılacak dağıtık üreticiler için izin verilebilir kapasitelerin belirlenebilmesi yönünde kullanılabilir. Ayrıca, bir sisteme ait barındırma kapasitesi veya en uygun boyutlandırmanın belirlenmesi üzerine gerçekleştirilecek optimizasyon çalışmalarında, sistemin gerilim kısıtlarını gözetilen bir işlem adımı olarak kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

---

- [1] BP, (2018). BP Energy Outlook 2018 Edition.
- [2] IEA ve World Bank, (2014). 2014 Global Tracking Framework, .
- [3] Denholm, P. ve Short, W., (2006). "An Evaluation of Utility System Impacts and Benefits of Optimally Dispatched Plug-In Hybrid Electric Vehicles", NREL Report noTP-620, (October):41.
- [4] Enerdata, Global Energy Statistical Yearbook 2016, <https://yearbook.enerdata.net/#world-electricity-production-map-graph-and-data.html>, 04 Şubat 2018.
- [5] Liserre, M., Sauter, T., ve Hung, J. Y., (2010). "Future energy systems: Inegrating renewable energy into the smart power grid through industrial electronics", IEEE Ind. Electron. Mag., 4(March):18–37.
- [6] Ackermann, T., Andersson, G., ve Söder, L., (2001). "Distributed generation a definition", Electric Power Systems Research, 57(3):195–204.
- [7] El-Khattam, W. ve Salama, M. M. , (2004). "Distributed generation technologies, definitions and benefits", Electric Power Systems Research, 71(2):119–128.
- [8] McDermott, T. E. ve Dugan, R. C., (2003). "PQ, reliability and DG", IEEE Industry Applications Magazine, 9(5):17–23.
- [9] Bollen, M. ve Hassan, F., (2011). Integration of Distributed Generation in the Power System, .
- [10] Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., ve D'haeseleer, W., (2005). "Distributed generation: definition, benefits and issues", Energy Policy, 33(6):787–798.
- [11] Sallam, A. A. ve Malik, O. P., (2011). Electric Distribution Systems, John Wiley & Sons, Inc. ,Hoboken, NJ, USA.
- [12] Bin Humayd, A. S. ve Bhattacharya, K., (2017). "Distribution system planning to accommodate distributed energy resources and PEVs", Electric Power Systems Research, 145:1–11.
- [13] Dugan, R. C., McDermott, T. E., ve Ball, G. J., (2001). "Planning for distributed generation", IEEE Industry Applications Magazine, 7(2):80–88.
- [14] Singh, B. ve Sharma, J., (2017). "A review on distributed generation planning",

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76529–544.

- [15] Vinet, L. ve Zhedanov, A., (2011). "A "missing" family of classical orthogonal polynomials", *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8):85201.
- [16] Viral, R. ve Khatod, D. K., (2012). "Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7):5146–5165.
- [17] Ehsan, A. ve Yang, Q., (2018). "Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques", *Applied Energy*, 21044–59.
- [18] Prakash, P. ve Khatod, D. K., (2016). "Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57111–130.
- [19] Luna-Rubio, R., Trejo-Perea, M., Vargas-Vázquez, D., ve Ríos-Moreno, G. J., (2012). "Optimal sizing of renewable hybrids energy systems: A review of methodologies", *Solar Energy*, 86(4):1077–1088.
- [20] Georgilakis, P. S. ve Hatziargyriou, N. D., (2013). "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research", *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3):3420–3428.
- [21] Tan, W.-S., Hassan, M. Y., Majid, M. S., ve Abdul Rahman, H., (2013). "Optimal distributed renewable generation planning: A review of different approaches", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18626–645.
- [22] Vovos, P. N., Kiprakis, A. E., Wallace, A. R., ve Harrison, G. P., (2007). "Centralized and Distributed Voltage Control: Impact on Distributed Generation Penetration", *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(1):476–483.
- [23] Bollen, M. H. J., Yang, Y., ve Hassan, F., (2008). "Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach", 2008 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 2008, 1–8.
- [24] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasası dağıtım yönetmeliği. 28870, 01.1.2014
- [25] T.C. Resmi Gazete, Elektrik şebeke yönetmeliği. 29013, 28.5.2014
- [26] Bhowmik, A., Maitra, A., Halpin, S. M., ve Schatz, J. E., (2003). "Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2):619–624.
- [27] Seuss, J., Reno, M. J., Broderick, R. J., and Grijalva, S., (2015). "Improving distribution network PV hosting capacity via smart inverter reactive power support", 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 2015, 1–5.
- [28] Bollen, M. H. J. ve Rönnberg, K. S., (2017). "Hosting Capacity of the Power Grid for Renewable Electricity Production and New Large Consumption Equipment", *Energies*, 10(9):1325.

- [29] Schwaegerl, C., Bollen, M. H. J., Karoui, K., ve Yagmur, A., (2005). "Voltage control in distribution systems as a limitation of the hosting capacity for distributed energy resources", CIRED 2005: 18th International Conference And Exhibition on Electricity Distribution, 2005, 6–9.
- [30] Etherden, N. ve Bollen, M. H. J., (2011). "Increasing the hosting capacity of distribution networks by curtailment of renewable energy resources", 2011 IEEE Trondheim PowerTech, June 2011, 1–7.
- [31] Altin, M., Oguz, E. U., Bizkevelci, E., and Simsek, B., (2014). "Distributed generation hosting capacity calculation of MV distribution feeders in Turkey", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe, October 2014, 1–7.
- [32] VDE-AR-N 4105, (2011). Technical requirements for the connection to and parallel operation with low-voltage distribution networks, VDE
- [33] Deutsches Windenergie-Institut GmbH Tech-wise A/S, (2001). Wind Turbine Grid Connection and Interaction
- [34] Nien-Che Yang ve Tsai-Hsiang Chen, (2012). "A review on evaluation of maximum permissible capacity of distributed generations connected to a smart grid", 2012 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, July 2012, 1589–1593.
- [35] Ackermann, T., (2005). Wind Power in Power Systems, John Wiley & Sons, Ltd ,Chichester, UK.
- [36] Papathanassiou, S. A. ve Hatziargyriou, N. D., (2001). "Technical requirements for the connection of dispersed generation to the grid", 2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262), 2001, 749–754.2.
- [37] Papathanassiou, S. A., (2007). "A technical evaluation framework for the connection of DG to the distribution network", Electric Power Systems Research, 77(1):24–34.
- [38] Jothibas, S. ve Santoso, S., (2016). "Sensitivity analysis of photovoltaic hosting capacity of distribution circuits", 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), July 2016, Austin, 1–5.
- [39] Doğanşahin, K., Kekezoğlu, B., Yumurtacı, R., Erdinç, O., ve Catalão, J., (2018). "Maximum Permissible Integration Capacity of Renewable DG Units Based on System Loads", Energies, 11(2):255.
- [40] Ackermann, T., Andersson, G., ve Söder, L., (2001). "Distributed generation: A definition", Electric Power Systems Research, 57(3):195–204.
- [41] Lasseter, R. H., (2010). "Microgrids and distributed generation", Intelligent Automation and Soft Computing, 16(2):225–234.
- [42] Chiradeja, P., "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis", 2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference Exposition: Asia and Pacific, , 1–5.
- [43] Dang, K., Yu, J., Dang, T., ve Han, B., (2011). "Benefit of distributed generation on

- line loss reduction", 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, ICECE 2011 - Proceedings, 2011, 2042–2045.
- [44] Lopes, J. A. P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., ve Jenkins, N., (2007). "Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities", *Electric Power Systems Research*, 77(9):1189–1203.
- [45] Bayod-Rújula, A. A., (2009). "Future development of the electricity systems with distributed generation", *Energy*, 34(3):377–383.
- [46] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasası yan hizmetler yönetmeliği. 30252, 26.11.2017
- [47] Joos, G., Ooi, B. T., McGillis, D., Galiana, F. D., ve Marceau, R., (2000). "The potential of distributed generation to provide ancillary services", 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), 2000, 1762–1767.
- [48] Doyle, M. T., (2002). "Reviewing the impacts of distributed generation on distribution system protection", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2002, 103–105.
- [49] BBC Türkçe, Yeşil enerjinin beklenmedik sonucu: Almanya’da tüketicilere elektrik kullanmaları için para ödeniyor, <http://www.bbc.com/turkce/haberler-dunya-42493609>, .
- [50] Gonen, T., (2014). *Electrical Power Distribution Engineering*, CRC Press.
- [51] T.C. Resmi Gazete, Türkiye elektrik kurumu dışındaki kuruluşların elektrik üretimi, iletimi, dağıtımı ve ticareti ile görevlendirilmesi hakkında kanun. 18610, 19.12.1984
- [52] T.C. Resmi Gazete, Enerji piyasası kanunu. 24335, 03.3.2001
- [53] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasasında üretim faaliyetinde bulunmak üzere su kullanım hakkı anlaşması imzalanmasına ilişkin usul ve esaslar hakkında yönetmelik. 25150, 26.6.2003
- [54] T.C. Resmi Gazete, Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanun. 25819, 18.5.2005
- [55] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasası kanunu ve bazı kanunlarda değişiklik yapılmasına dair kanun. 26948, 26.7.2008
- [56] T.C. Resmi Gazete, Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik enerjisi üretimi amaçlı kullanımına ilişkin kanunda değişiklik yapılmasına dair kanun. 27809, 08.1.2011
- [57] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmelik. 28001, 21.7.2011.
- [58] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmeliğin uygulanmasına dair tebliğ. 28229, 10.3.2012.
- [59] T.C. Resmi Gazete, Elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimine ilişkin yönetmelik. 28783, 02.10.2013
- [60] TEİAŞ, (2017). 2016 Türkiye kurulu gücünün kuruluşlara dağılımı.

- [61] TEİAŞ, (2018). Türkiye elektrik sistemi kuruluş ve kaynaklara göre kurulu güç.
- [62] Sarkar, T. ve Dan, A. K., (2016). "Effect of X / R Ratio on Low Voltage Distribution System Connected with Constant Speed Wind Turbine", International Conference on Control, Instrumentation, Energy & Communication (CIEC), 417–421.
- [63] Merrell, J., (1999). The importance of the X / R ratio in low-voltage short circuit studies
- [64] Mahmud, M. A., Hossain, M. J., ve Pota, H. R., (2011). "Worst case scenario for large distribution networks with distributed generation", 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, 1–7.
- [65] Machowski, J., Bialek, J. W., ve Bumby, J. R., (2008). Power System Dynamics: Stability and Control, John Wiley & Sons.
- [66] Ward, J. B., (1949). "Equivalent Circuits for Power-Flow Studies", AIEE Transactions, 68(1):373–382.
- [67] Salama, M. M. A. ve Chikhani, A. Y., (1993). "A simplified network approach to the VAr control problem for radial distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, 8(3):1529–1535.
- [68] BALKAN, E., ETAP, <http://www.etapbalkan.com/>, 04.04.2018.
- [69] Bam, L. ve Jewell, W., (2005). "Review: power system analysis software tools", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, 2005, 146–151.
- [70] Anulipt Chandan, MATHWORKS Community File Exchange, <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/58884-ieee-30-bus-newton-raphson-load-flow-analysis>, 03.042018.

### 34 BARALI RADYAL TEST SİSTEMİ

Test sistemine ait hat bilgileri per unit cinsinden aşağıdaki çizelgede verildiği gibidir. Per unit hesaplamalarında, güç için baz değer olarak 1 MVA, gerilim için ise 11 kV alınmıştır.

Çizelge A-1 34 Baralı radyal test sistemine ait hat bilgileri

<i>Baradan</i>	<i>Baraya</i>	<i>R (pu)</i>	<i>X (pu)</i>
1	2	0,000967	0,000397
2	3	0,000886	0,000364
3	4	0,001359	0,000377
3	13	0,001299	0,000223
4	5	0,001359	0,000377
5	6	0,001359	0,000377
6	7	0,002598	0,000446
6	17	0,001483	0,000412
7	8	0,001732	0,000298
7	28	0,001299	0,000223
8	9	0,002595	0,000446
9	10	0,001732	0,000298
10	11	0,001083	0,000186
11	12	0,000866	0,000149
13	14	0,001732	0,000298
14	15	0,000866	0,000149
15	16	0,000433	7,44E-05
17	18	0,001359	0,000377
18	19	0,001718	0,000391
19	20	0,001562	0,000355
20	21	0,001562	0,000355
21	22	0,002165	0,000372
22	23	0,002165	0,000372



<i>Baradan</i>	<i>Baraya</i>	<i>R (pu)</i>	<i>X (pu)</i>
23	24	0,002598	0,000446
24	25	0,001732	0,000298
25	26	0,001083	0,000186
26	27	0,000866	0,000149
28	29	0,001299	0,000223
29	30	0,001299	0,000223
10	31	0,001299	0,000223
31	32	0,001732	0,000298
32	33	0,001299	0,000223
33	34	0,000866	0,000149



## NEWTON RAPHSON GÜÇ AKIŞ ANALİZİ MATLAB KODLARI

Aşağıda verilen MATLAB kodları, MATWORKS dosya paylaşım forumundan elde edilen çeşitli kodların yorumlanması ile oluşturulmuştur [70].

```

clc
clear all
%% Bara tip 1 (Salınım Barası)
%% Bara tip 2 (Generatör Barası)
%% Bara tip 3 (Yük Barası)
tic

      % Bara Bara Ger. Ger. Üretim      Yük      R. Güç Limit
      % No type Genlik Açık P Q      P Q      Qmax Qmin
busdata= [ 1 1 1.0 0 0 0 0 0 0 0 0;
           2 3 1.043 0 0 0 0.4 0.06 0 0;
           3 3 1.0 0 0 0 0 0 0 0;
           4 3 1.06 0 0 0 0.5 -0.075 0 0;
           5 3 1.01 0 0 0 0.8 0.16 0 0;
           6 3 1.0 0 0 0 0 0 0 0;
           7 3 1.0 0 0 0 0 0 0 0;
           8 3 1.01 0 0 0 0.23 0 0 0;
           9 3 1.0 0 0 0 0.1 0 0 0;
          10 3 1.0 0 0 0 0 0 0 0;
          11 3 1.082 0 0 0 0.13 0 0 0;
          12 3 1.0 0 0 0 0.75 0.135 0 0;
          13 3 1.071 0 0 0 0.57 0.086 0 0;
          14 3 1.0 0 0 0 0.6 0.09 0 0;
          15 3 1.0 0 0 0 0.42 0.063 0 0;
          16 3 1.0 0 0 0 0.47 0.071 0 0;
          17 3 1.0 0 0 0 0.21 0 0 0;
          18 3 1.0 0 0 0 0.23 0 0 0;
          19 3 1.0 0 0 0 0.12 0 0 0;
          20 3 1.0 0 0 0 0.1 0 0 0;
          21 3 1.0 0 0 0 0.11 0.036 0 0;
          22 3 1.0 0 0.9 0.436 0.13 0 0 0;
          23 3 1.0 0 0 0 0.11 0.036 0 0;
          24 3 1.0 0 0 0 0.13 0 0 0;
          25 3 1.0 0 0 0 0.12 -0.024 0 0;
          26 3 1.0 0 0 0 0.09 0 0 0;

```

```

27 3 1.0 0 0 0 0.55 0.09 0 0;
28 3 1.0 0 0 0 0.3 0 0 0;
29 3 1.0 0 0 0 0.21 0.036 0 0;
30 3 1.0 0 0 0 0.95 0.19 0 0;
31 3 1.0 0 0 0 0.14 0 0 0;
32 3 1.0 0 0 0 0.11 0 0 0;
33 3 1.0 0 0 0 0.12 -0.024 0 0;
34 3 1.0 0 2.7 1.308 0.1 0 0 0]
% Baradan Baraya R X B Adım
% (pu) (pu) (pu) Oranı
linedata=[ 1 2 0.0009669 0.0003967 0 1
2 3 0.0008864 0.0003636 0 1;
3 4 0.0013591 0.0003773 0 1;
4 5 0.0013591 0.0003773 0 1;
5 6 0.0013591 0.0003773 0 1;
6 7 0.0025983 0.0004463 0 1;
7 8 0.0017322 0.0002975 0 1;
8 9 0.002595 0.0004463 0 1;
9 10 0.0017322 0.0002975 0 1;
10 11 0.0010826 0.000186 0 1;
11 12 0.0008661 0.0001488 0 1;
3 13 0.0012992 0.0002231 0 1;
13 14 0.0017322 0.0002975 0 1;
14 15 0.0008661 0.0001488 0 1;
15 16 0.0004331 0.0000744 0 1;
6 17 0.0014826 0.0004116 0 1;
17 18 0.0013591 0.0003773 0 1;
18 19 0.0017182 0.0003909 0 1;
19 20 0.001562 0.0003554 0 1;
20 21 0.001562 0.0003554 0 1;
21 22 0.0021653 0.0003719 0 1;
22 23 0.0021653 0.0003719 0 1;
23 24 0.0025983 0.0004463 0 1;
24 25 0.0017322 0.0002975 0 1;
25 26 0.0010826 0.000186 0 1;
26 27 0.0008661 0.0001488 0 1;
7 28 0.0012992 0.0002231 0 1;
28 29 0.0012992 0.0002231 0 1;
29 30 0.0012992 0.0002231 0 1;
10 31 0.0012992 0.0002231 0 1;
31 32 0.0017322 0.0002975 0 1;
32 33 0.0012992 0.0002231 0 1;
33 34 0.0008661 0.0001488 0 1];

%% Hat bilgilerinin düzenlenmesi
fb=linedata(:,1);tb=linedata(:,2);
r=linedata(:,3);x=linedata(:,4);
b=linedata(:,5);a=linedata(:,6);
z=r+li*x; % Hatların empedansı
y=1./z; % Hatların admitansı
b=li*b;
nl=length(fb); % Hat sayısı
No_of_Bus=max(max(fb),max(tb)); % Bara sayısı

%% Admitans matrisin oluşturulması
Y=zeros(No_of_Bus,No_of_Bus);
for k=1:nl
Y(fb(k),tb(k))=Y(fb(k),tb(k))-y(k)/a(k);
Y(tb(k),fb(k))=Y(fb(k),tb(k));
end

```

```

for m=1:No_of_Bus
    for n=1:n1
        if fb(n)==m
            Y(m,m)=Y(m,m)+y(n)/a(n)^2+b(n);
        elseif tb(n)==m
            Y(m,m)=Y(m,m)+y(n)+b(n);
        end
    end
end
end
G=real(Y);B=imag(Y);
BMva=1;
busNo=busdata(:,1);type=busdata(:,2);V=busdata(:,3);del=busdata(:,4);
Pg=busdata(:,5)/BMva;Qg=busdata(:,6)/BMva;Pl=busdata(:,7)/BMva;
Ql=busdata(:,8)/BMva;Qmin=busdata(:,9)/BMva;Qmax=busdata(:,10)/BMva;
PV_Bus=find(type==2|type==1);PQ_Bus=find(type==3);
No_of_PQ_Bus=length(PQ_Bus);No_of_PV_Bus=length(PV_Bus);
Active_Power_specified=Pg-Pl;Reactive_Power_specified=Qg-Ql; % Net
Iter=1;Tol=1; % İterasyon sayısı ve tolerans değeri
%% Newton Raphson Güç Akışı
while Tol>1e-5
    P=zeros(No_of_Bus,1);
    Q=zeros(No_of_Bus,1);
    for i=1:No_of_Bus
        for j=1:No_of_Bus
            P(i)=P(i)+V(i)*V(j)*(G(i,j)*cos(del(i)-del(j))+B(i,j)*sin(del(i)-del(j)));
            Q(i)=Q(i)+V(i)*V(j)*(G(i,j)*sin(del(i)-del(j))-B(i,j)*cos(del(i)-del(j)));
        end
    end
    % Raktif güç değerleri için sınır değerlerin kontrolü
    if Iter>2 && Iter<=7
        for n=2:No_of_Bus
            if type(n)==2
                QG=Q(n)+Ql(n);
                if QG > Qmax(n)
                    V(n)=V(n)-0.01;
                elseif QG < Qmin(n)
                    V(n)=V(n)+0.01;
                end
            end
        end
    end
    dPa=Active_Power_specified-P;
    dQa=Reactive_Power_specified-Q;
    dP=dPa(2:No_of_Bus);
    k=1;
    dQ=zeros(No_of_PQ_Bus,1);
    for i=1:No_of_Bus
        if type(i)==3
            dQ(k,1)=dQa(i);
            k=k+1;
        end
    end
    M=[dP;dQ];
    %% Jacobian Matrislerin oluşturulması[J1 J2;J3 J4]
    %% J1 Matrisinin oluşturulması
    J1=zeros(No_of_Bus-1,No_of_Bus-1);
    for i=1:No_of_Bus-1
        m=i+1;

```

```

        for j=1:No_of_Bus-1;
            n=j+1;
            if m==n
                for n=1:No_of_Bus
                    J1(i,j)=J1(i,j)+V(m)*V(n)*(-G(m,n)*sin(del(m)-
del(n))+B(m,n)*cos(del(m)-del(n)));
                    end
                    J1(i,j)=J1(i,j)-V(m)^2*B(m,m);
                else
                    J1(i,j)=V(m)*V(n)*(G(m,n)*sin(del(m)-del(n))-
B(m,n)*cos(del(m)-del(n)));
                end
            end
        end
end
end
%% J1 Materisinin oluşturulması
J2=zeros(No_of_Bus-1,No_of_PQ_Bus);
for i=1:No_of_Bus-1
    m=i+1;
    for j=1:No_of_PQ_Bus
        n=PQ_Bus(j);
        if m==n
            for n=1:No_of_Bus
                J2(i,j)=J2(i,j)+V(n)*(G(m,n)*cos(del(m)-
del(n))+B(m,n)*sin(del(m)-del(n)));
            end
            J2(i,j)=J2(i,j)+V(m)*G(m,m);
        else
            J2(i,j)=V(m)*(G(m,n)*cos(del(m)-
del(n))+B(m,n)*sin(del(m)-del(n)));
        end
    end
end
end
%% J1 Materisinin oluşturulması
J3=zeros(No_of_PQ_Bus,No_of_Bus-1);
for i=1:No_of_PQ_Bus
    m=PQ_Bus(i);
    for j=1:No_of_Bus-1
        n=j+1;
        if m==n
            for n=1:No_of_Bus
                J3(i,j)=J3(i,j)+V(m)*V(n)*(G(m,n)*cos(del(m)-
del(n))+B(m,n)*sin(del(m)-del(n)));
            end
            J3(i,j)=J3(i,j)-V(m)^2*G(m,m);
        else
            J3(i,j)=V(m)*V(n)*(-G(m,n)*cos(del(m)-del(n))-
B(m,n)*sin(del(m)-del(n)));
        end
    end
end
end
%% J1 Materisinin oluşturulması
J4=zeros(No_of_PQ_Bus,No_of_PQ_Bus);
for i=1:No_of_PQ_Bus
    m=PQ_Bus(i);
    for j=1:No_of_PQ_Bus
        n=PQ_Bus(j);
        if m==n
            for n=1:No_of_Bus
                J4(i,j)=J4(i,j)+V(n)*(G(m,n)*sin(del(m)-del(n))-
B(m,n)*cos(del(m)-del(n)));
            end
        end
    end
end

```

```

        end
        J4(i,j)=J4(i,j)-V(m)*B(m,m);
    else
        J4(i,j)=V(m)*(G(m,n)*sin(del(m)-del(n))-
B(m,n)*cos(del(m)-del(n)));
    end
end
end
end
J=[J1 J2;J3 J4]; % Jacobian Matris
X=inv(J)*M;
dTh=X(1:No_of_Bus-1); % Açık değişimi
dV=X(No_of_Bus:end); % Genlik değişimi
del(2:No_of_Bus)=del(2:No_of_Bus)+dTh; %Gerilim açısı güncellemesi
% Gerilim genliği güncellemesi
k=1;
for n=2:No_of_Bus
    if type(n)==3
        V(n)=V(n)+dV(k);
        k=k+1;
    end
end
Iter=Iter+1;
Tol=max(abs(M));
end
Q=zeros(No_of_Bus,1);
for i=1:No_of_Bus
    for j=1:No_of_Bus
        P(i)=P(i)+V(i)*V(j)*(G(i,j)*cos(del(i)-
del(j))+B(i,j)*sin(del(i)-del(j)));
        Q(i)=Q(i)+V(i)*V(j)*(G(i,j)*sin(del(i)-del(j))-
B(i,j)*cos(del(i)-del(j)));
    end
end
for i=1:No_of_Bus
    del(i)=180*del(i)/pi; % Radyandan dereceye geçiş
end
%% Güç Akış Analizi Sonuçları
disp('-----');
disp('  Newton Raphson Loadflow Solution  ');
disp('-----');
disp(' |Bus |   |Voltage|   |Angle |');
disp(' | No.|   |pu      |   |Degree|');
disp('-----');
for m=1:No_of_Bus
    fprintf(' %3g   ',m);
    fprintf(' %8.3f   ',V(m));
    fprintf(' %8.3f   ',del(m));
    fprintf(' %8.3f   ',(Pg(m)+Pl(m))*BMva);
    if type(m)==2
        fprintf(' %8.3f   ',(Q(m)+Ql(m))*BMva);
    end
    fprintf('\n');
end
%% Ward indirgeme yönteminde kullanılacak matrislerin oluşturulması
solvedbusdata=[(1:1:No_of_Bus)' busdata(:,2) V del ((Pg)*BMva)
((Qg)*BMva) (Pl*BMva) (Ql*BMva) busdata(:,9) busdata(:,10) ];
disp('-----');
fprintf(' Number Of Iteration %3g \n',Iter)
toc

```

## WARD İNDİRGEME YÖNTEMİ MATLAB KODLARI

```

% Sistemde kalacak Baralara ait girdinin kullanıcıdan istenmesi
prompt = 'Lütfen sistemde kalacak baraları belirtiniz (örn. [1,2,3])';
x = inputdlg([prompt]);
x=str2num(x{1});
%Admitans matrisinin düzenlenmesi
YN=1:1:No_of_Bus;
k=ismember(YN,x);
YN=find(k==0);
No_of_ret_bus=length(x);
Ynew=zeros(34);
for i=1:No_of_Bus
    if i<=No_of_ret_bus
        for j=1:No_of_Bus
            if j<=No_of_ret_bus
                Ynew(i,j)=Y(x(i),x(j));
            else
                Ynew(i,j)=Y(x(i),YN(j-No_of_ret_bus));
            end
        end
    else
        for j=1:No_of_Bus
            if j<=No_of_ret_bus
                Ynew(i,j)=Y(YN(i-No_of_ret_bus),x(j));
            else
                Ynew(i,j)=Y(YN(i-No_of_ret_bus),YN(j-No_of_ret_bus));
            end
        end
    end
end
clear i
% Admitans matrisinin indirgenmesi
Y1=Ynew(1:No_of_ret_bus,1:No_of_ret_bus);
Y2=Ynew(1:No_of_ret_bus,(No_of_ret_bus+1):No_of_Bus);
Y3=Ynew((No_of_ret_bus+1):No_of_Bus,1:No_of_ret_bus);
Y4=Ynew((No_of_ret_bus+1):No_of_Bus,(No_of_ret_bus+1):No_of_Bus);
Yred=Y1-((Y2*inv(Y4))*Y3)
% Bara bilgilerinin düzenlenmesi
[row,coloumn]=size(busdata)

```

```

solvedbusdatanew=zeros(row,coloumn);
for p=1:1:No_of_Bus
    if p<=No_of_ret_bus
        solvedbusdatanew(p,:)=solvedbusdata(x(p),:);
    else
        solvedbusdatanew(p,:)=solvedbusdata(YN(p-No_of_ret_bus),:);
    end
end
end
% Güç Akış sonuçlarına göre düğüm akımları vektörünün elde edilmesi
Vcomp=solvedbusdatanew(:,3).*(cosd(solvedbusdatanew(:,4))+sind(solvedb
usdatanew(:,4)*1j));
Power=(solvedbusdatanew(:,5)-
solvedbusdatanew(:,7)+(solvedbusdatanew(:,6)-
solvedbusdatanew(:,8)).*i)./BMva;
Current=conj(Power./Vcomp);
% Düğüm akımları vektörünün indirgenmesi
CurrentRed=(Current(1:No_of_ret_bus)-
((Y2*inv(Y4))*Current(No_of_ret_bus+1:end)))
% Gerilimlerin hesaplanması
Vdif=(inv(Yred(2:end,2:end))*Yred(2:end,1));
Vnew=(inv(Yred(2:end,2:end))*CurrentRed(2:end))-Vdif

```



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** :Kadir DOĞANŞAHİN  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :05.06.1986, Malatya  
**Yabancı Dili** :İngilizce  
**E-posta** :kaidogansahin@gmail.com

### ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2018
Y. Lisans	Elektrik Tesisleri	University of TEXAS at San Antonio	2014
Lisans	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	2010

### İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010 – 2011	GEMTAŞ AŞ	Saha Mühendisi
2011 – 2012	TR mühendislik	Saha Mühendisi
2012 – 2012	Aysu Elektrik	Şantiye Şefi
2012 – Halen	Artvin Çoruh Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

## **YAYINLARI**

### **Makale**

1. Dođanřahin, K., Kekezođlu, B., Yumurtacı, R., Erdinç, O., and Catalăo, J., (2018). "Maximum Permissible Integration Capacity of Renewable DG Units Based on System Loads", *Energies*, 11(2):255.

### **Bildiri**

1. Efe B., Durna B., Doğanşahin K., İzgi E., şahin A.D., (2016). "Okul Çatısına Fotovoltaik Kurulumu, Sarıyer Örneği", *UTES*, 722
2. Doğanşahin, K., Kekezoğlu, B., Yumurtacı, (2017). "Network Reduction Methods on DG planning studies", *ICENTE*, 501.
3. Doğanşahin, K., Kekezoğlu, B., Yumurtacı, (2017). "Impacts of DG Integration on Loadability of Power Systems and A Review for Existing Approaches", *ICAIE*,55.

### **Proje**

1. İstanbul ve Çevresi Güneş Enerjisi Ölçüm ve Takibi, (2015), Araştırmacı
2. Büyükçekmece Barajı Gölünde Yüzer Fotovoltaik Sistemleri ile Güneş Enerjisinden Elektrik Üretimi Fizibilite Araştirması ve Raporlanması, (2016), Araştırmacı
3. Sarıyer Hüseyin Kalkavan Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi Nde Fotovoltaik Sistemlerin Uygunluğu ve Konuşlandırma Dizayninin Araştirmasının Yapılması ve Güneş Enerjisi ile Elektrik Enerjisi Üretme İşinin Bilimsel Araştırma Eksenli Fizibilite Raporu, (2016), Araştırmacı
4. Büyükçekmece Gölü Üzerine 9 kWp Fotovoltaik Sistem Kurulumu İşı, (2017), Danışman